

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ТА ПРИСТРОЇВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ “ПЛАЗМОВА ТА ІМПУЛЬСНА
ЕЛЕКТРОНІКА”

для студентів спеціальності
“Електронні прилади та пристрої”
всіх форм навчання

Ухвалено методичною
комісією факультету (інституту)
Факультету електроніки
(назва факультету, інституту)

Протокол №01/13 від 28 січня 2013 р.

Голова методичної комісії

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Програму рекомендовано кафедрою
Кафедра електронних приладів та
пристроїв
(назва кафедри)

Протокол № _____ від « ____ » _____ 2012 р.
(протокол №, дата)

Завідувач кафедри

(підпис)

Писаренко Л.Д.
(ініціали, прізвище)

Київ – 2013

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “Плазмова та імпульсна електроніка” для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої» / Уклад.: А.І. Кузьмичев, С.Б. Сидоренко, О.М. Бевза –К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 84 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з курсу
“Плазмова та імпульсна електроніка”

Укладачі: А.І. Кузьмичев, , канд. техн. наук, доц, С.Б. Сидоренко, інж,
О.М. Бевза, ас.

Відповідальний
за випуск А.І. Кузьмичев, канд. техн. наук, доц.

Рецензенти: Л.М. Шмирева, канд. техн. наук, доц.

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОННОГО ПЛАЗМОВОГО РОЗРЯДУ	4
Лабораторна робота № 2 БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	14
Лабораторна робота № 3 ЗАСТОСУВАННЯ КОРОННОГО ТА БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В АППАРАТАХ ДЛЯ СИНТЕЗУ ОЗОНУ	21
Лабораторна робота № 4 ГАЗОРОЗРЯДНІ ЛЮМІНІСЦЕНТНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА	32
Лабораторна робота № 5 ПЛАЗМОХІМІЧНЕ ТРАВЛЕННЯ	46

Лабораторна робота № 1

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОННОГО ПЛАЗМОВОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи: ознайомитися із принципом роботи магнетронних розпилювальних систем, їхніх конструкцій, виміряти основні параметри й вивчити технологію одержання з їхньою допомогою тонкоплівкових покриттів.

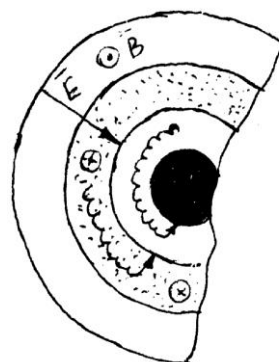
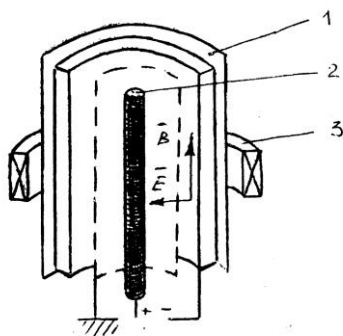
Фізичні основи процесу іонно-плазмового напилювання плівок

Іонне розпилення при низьких тисках є одним з найбільш перспективних методів виготовлення мікросхем оскільки воно дозволяє одержувати різноманітні тонкі плівки при малому ступені забруднення. Сутність процесу нанесення тонких плівок полягає в створенні в робочому об'ємі установки газового розряду, подачі від'ємного потенціалу щодо газорозрядної плазми на розпалюваний електрод, бомбардуванню іонами негативного електрода а потім в осадженні розпиленого матеріалу на підкладці.

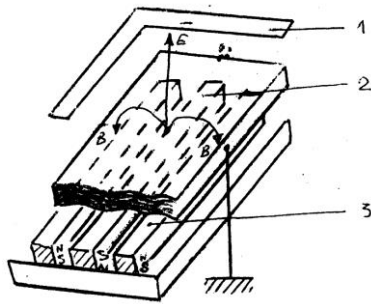
У такий спосіб для нанесення тонких плівок методом іонного напилювання необхідно вирішити два завдання: по-перше, створити інтенсивний потік іонів на електрод, що розпилюється, для одержання високої швидкості розпилення й збільшення продуктивності процесу, а по-друге, зменшити розсіювання матеріалу у робочому газі під час його підльоту до підкладки.

Основні відомості про магнетронні системи

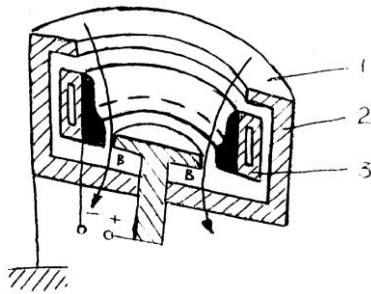
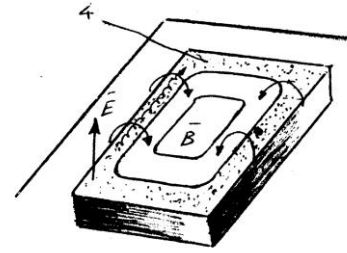
У технології мікроелектронних приладів широко використовуються нові системи іонно-плазмового напилювання - магнетронні розпилювальні системи (МРС) різного типу, що слугує в основному для металізації ІМС. Типова МРС, як правило, містить один або кілька магнетронів, джерело живлення пристрою автоматичної підтримки тиску робочого газу й керування технологічним процесом і т.д.



а - із циліндричним катодом;



б - із плоским катодом (планарна);



в - з кільцевим катодом S-типу;

Рис. 1. Схема базових конструкцій магнетронів.

1 - анод; 2 - катод-мішень; 3 - магнітна система; 4 - зона розряду.

Метод магнетронного розпилення заснований на використанні схрещених магнітних і електричних полів для підвищення ефективності іонізації робочого газу й створення над поверхню катода-мішені області щільної плазми. Розроблено три базові конструкції магнетронів (рис. 1). Всі вони – циліндрична, планарна і з кільцевим катодом мають спільні риси. Ці конструкції являють собою двоелектродні розпилювальні системи, тобто містять анод і катод-мішень, виготовлений з матеріалу, що розпилюється, і перебуває під негативним потенціалом. У всіх випадках для формування плазми використається магнітне поле, лінії якого перпендикулярні до ліній електричного поля, мають значну кривизну й проходять через поверхню катода-мішені. Зона тліючого розряду щільної плазми низького тиску має замкнуту конфігурацію й локалізована над певною ділянкою поверхні катоду-мішені, в області дії магнітного поля, де й відбувається активне розпилення матеріалу.

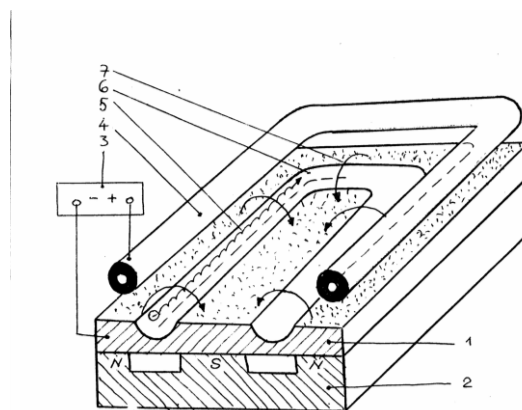


Рис. 2. Схема магнетронної системи розпилення із плоскою мішенню:

1 - мішень-катод; 2 - система постійних магнітів; 3 - джерело живлення; 4 - анод; 5 - траєкторія руху електронів; 6 - зона інтенсивного розпилення; 7 - силові лінії магнітного поля.

Області розряду в різних системах магнетронів мають неоднакову форму, тому й форми зони ерозії мішені, що являється однієї з найважливіших характеристик магнетронів, різні.

Формування області розряду із заданими параметрами пов'язане з конструюванням всіх функціональних вузлів магнетронів, що забезпечує якісні характеристики розпилювальних систем, і зокрема, високі швидкості осадження матеріалу що розпилюється.

Характеристики систем для розпилення

Таблиця 2

Вид системи для розпилення	Робочий тиск, Па	Робоча напруга, кВ	Сила іонного струму, А	Потужність, що підводиться до системи, кВт	Коефіцієнт перетворювання потужності	Енергетична ефективність (по міді), 10^{-9} кг/Дж		Енергія іонів, що бомбардують, кеВ
						процесу розпилення	Системи що розпилює	
діодна на постійному струмі	1,3...13	3...5	0,5...0,8	2...5	0,5...0,6	0,9...1,4	0,5...0,7	2...3,5
діодна ВЧ	0,6...6,6	1...2 (амплітуда)	1...2	3...5	0,3...0,6	1,6...2,5	0,5...1	0,7...1,5
тріодна	$(0,6...6,6) \times 10^{-1}$	1...2	3...5	10...15	0,3...0,7	1,4...2,1	0,6...1	1...2
тріодна з локалізацією плазми магнітним полем	$(1,3...13) \times 10^{-2}$	1...2	10...15	35...40	0,3...0,7	1,4...2,1	0,6...1	1...2
з автономним іонним джерелом	$(0,6...6,6) \times 10^{-1}$ у джерелі $(1,3...13) \times 10^{-2}$	1...3	0,2...0,5	8...10	0,03...0,15	1...2,1	0,06...0,15	1...3
магнетронна ВЧ	$(1,3...6,6) \times 10^{-1}$	0,7...1 (амплітуда)	2...4	3...5	0,3...0,6	2,5...3	0,9...1,5	0,5...0,7
магнетронна на постійному струмі	$(1,3...6,6) \times 10^{-1}$	0,4...0,8	15...20	8...15	0,6...0,7	3...3,8	2,1...2,3	0,3...0,5

Розглянемо принцип роботи МРС із плоскою мішенню (рис. 2). При включенні напруги між катодом і анодом при тиску робочого газу порядку 0.3 Па запалюється тліючий розряд. Іони з розряду, бомбардуючи катод, викликають емісію електронів. Прискорюючись електричним полем ці електрони підтримують розряд, і, під впливом поперечного магнітного поля, рухаються по складних циклоїдних траєкторіях. При цьому електрони потрапляють ніби у пастку: з одного боку, магнітне поле повертає їх на катод, а з іншого - поверхня катода їх відштовхує. Тривала циркуляція електронів сприяє посиленню процесу іонізації, концентрація іонів у поверхні катода росте. Плазма концентрується в області магнітного поля безпосередньо в мішені. Інтенсивність бомбардування мішені іонами із плазми в такій конструкції і, отже, швидкість розпилення катода й нанесення плівок значно збільшуються.

Рух заряджених часток у плазмі, на якій накладені неоднорідні електричні й магнітні поля досить складний. Він складається зі спрямованого, дифузійного і дрейфового, переміщень, а також циклотронного обертання.

Робота магнетронних систем при відносно малих тисках робочого газу (рис. 3) спричиняє переважно спрямований рух електронів і іонів у плазмі. Існуючі в ній області об'ємного заряду, катодного й анодного спадів напруги, характеризуються високими напруженостями полів. Відношення напруженості до тиску є критерієм оцінки виду руху часток у плазмі, перевищує 10^5 В/мПа .

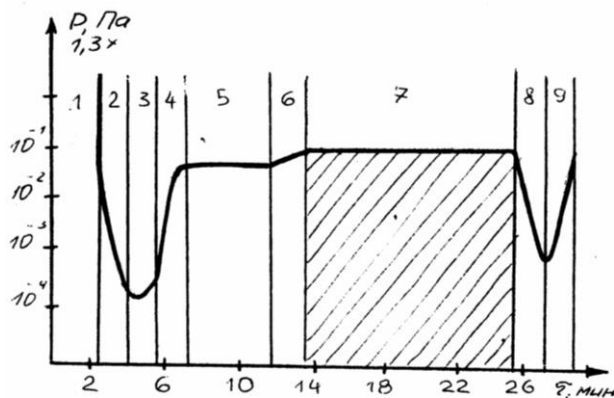


Рис. 3. Графік тимчасового циклу технологічного процесу формування металізації зі сплаву Al-Si товщиною 1 мкм на установці магнетронного розпилення:

1 - попередня відкачка; 2 - високовакумна відкачка; 3 - переміщення підкладок через шлюз; 4 - напуск аргону; 5 - іонне очищення; 6 - вихід на режим розпилення; 7 - розпилення; 8 - переміщення підкладок; 9 - закінчення циклу.

Циклотронне обертання заряджених часток плазми відбувається в площині, перпендикулярній до магнітного поля. Це обертання характеризується циклотронною частотою:

$$\omega = \frac{e \cdot z \cdot B}{m}$$

де e - заряд електрона; z - кратність заряду іона; B - індукція магнітного поля; m - маса частки, а також ларморовським радіусом обертання:

$$r_e = \frac{v_1}{\omega}$$

де v_1 - складова швидкості переміщення частки в напрямку, перпендикулярному до силових ліній магнітного поля.

Дрейф частки в напрямку, перпендикулярному електричному й магнітному полям, характеризується швидкістю:

$$v_d = \frac{E}{B}$$

Якщо не враховувати початкову швидкість зарядженої частки, то в однорідному електричному й магнітному полях траєкторія її руху буде циклоїдою, висота якої дорівнює двом ларморовським радіусам:

$$h_{\delta} = \frac{2 \cdot m \cdot E}{e \cdot z \cdot B}$$

У магнетронних пристроях і магнітне, і електричне поле неоднорідні, внаслідок чого в плазмі існують і інші дрейфові рухи.

Енергія, одержувана електроном від електричного поля, витрачається на іонізацію атомів робочого газу й підтримку плазмового розряду. Прискорення електрона полем відбувається в основному в області темного катодного простору шириною a_{δ} , а далі на відстані h_{δ} він попадає в область плазми. Ширина темного катодного простору, мм:

$$\alpha_{\delta} = 3,37 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{U_{\delta}}}{B_{\delta}}$$

де U - спад напруги в області темного катодного простору, В; B_k - індукція магнітного поля в тій же області, Тл.

Електрони, що покинули область темного катодного простору, зіштовхуються з атомами робочого газу й іонізують їх. Втрачаючи свою первісну енергію електрони дифундують до анода. При цьому анод системи повинен бути розташований трохи далі границі області, де електрон в основному губить свою енергію на утворення плазми, область плазми називається умовним анодом, вилучена від поверхні катода на відстань

$$x_0 = \frac{2 \cdot m_e \cdot E \cdot U_p}{W \cdot B^2}$$

де m_e – маса електрона; U_p - напруга розряду; W – енергія, що витрачається електроном на один акт іонізації.

Внаслідок неоднорідності магнітного й електричного полів плазма приймає форму, близьку до тороїдальної, і розташовується безпосередньо біля поверхні мішені. Найбільш щільна плазма - у центральній частині, тому більш інтенсивне розпилення мішені спостерігається саме в цій області. Вибором раціональної геометрії мішені можна створити умови для нанесення рівномірних по товщині покриттів на нерухомі підкладки. Іншими способами одержання рівномірних покриттів є створення декількох зон розпилення, планетарне обертання підкладок і лінійне переміщення підкладок з використанням спеціальних профілюючих екранів.

У планетарних магнетронних системах магніти монтуються у водоохолоджуваних корпусах і не забруднюють зарядну область. Ефект перехоплення розпилених атомів тут практично повністю усунутий. Високі щільності струму на охолоджуваній мішені дозволяють у планетарних системах досягати швидкості розпилення, порівнянних зі швидкостями, одержуваними методами термічного випару. Недоліком є мала площа катода й нерівномірність його ерозія (коефіцієнт використання матеріалу - 25...30%).

Установка для виконання лабораторної роботи.

Технічні дані.

Вакуумна установка УВН-1 (УВН-2) призначена для відпрацювання технології напилювання тонких плівок.

1. Гранично допустиме розрідження в робочій камері з використанням азотної пастки - 10^{-6} мм.рт.ст.
2. Швидкість відкачки робочого обсягу при тиску $2 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^5$ мм.рт.ст. - 700 л/сек.

3. Живлення установки здійснюється 3-х фазним струмом від 4-х провідної лінії (з нульовим проводом) частотою 50 Гц, напругою 380 В.
4. Електрична потужність, споживана установкою при сталому режимі, не більше 7,2 кВт.
5. Мінімальна витрата холодної води - 400 л/година.
6. Габаритні розміри:
 - а. довжина х ширина х висота, мм - 1550х1050х1950;
 - б. підйом ковпака - 650 мм.
7. Вага установки - 700 кг.

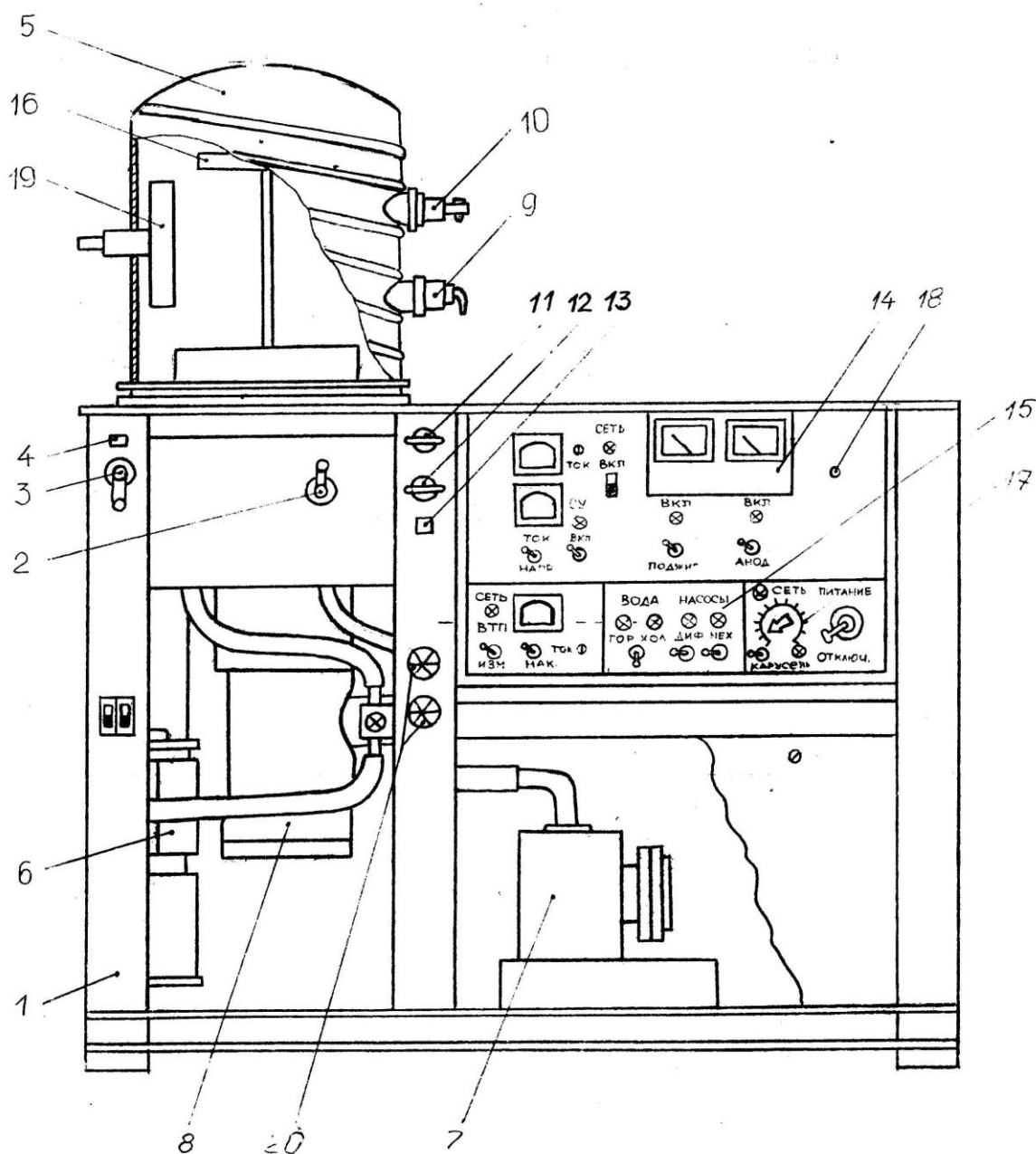


Рис. 4. Зовнішній вигляд агрегату

Установка (рис. 4) складається з металевого корпуса 1, що має знімні бічні, передні й задні щити. На передній панелі перебуває рукоятка керування вакуумним затвором 2 і органи управління гідроприводу 3 і 4 і підйому ковпака 5.

Вакуумний ковпак 5 виконаний з нержавіючої сталі, має два оглядових вікна 150 мм у діаметрі. Підйом і опускання ковпака здійснюється гідроприводом 6.

Вакуумна система складається з обертального насоса ВН-6-2Н (7), паромасляного високовакуумного насоса Н-2Т (8), клапанної коробки для перемикання механічного насоса, високовакуумного насоса, системи натікачів 9, 10 для напуску повітря й інших газів у ковпак, трубопроводів і охолоджуваної пастки.

Рукоятки клапанної коробки 11, 12 виведені на середню стійку каркаса. При витягуванні верхньої рукоятки 11 механічний насос відкачує робочий обсяг ковпака, при витягуванні нижньої рукоятки 12 відкачується порожнина паромасляного насоса.

Вентиль-натікач (голчастий 9), укріплений на ковпаку, дозволяє підтримувати заданий ступінь вакууму в діапазоні 10^{-1} - 10^{-5} мм.рт.ст. Натікач (грубий) 10 призначений для напуску атмосфери під ковпак. Електромагнітний вентиль-натікач відкриває напуск атмосфери в трубопровід обертального вакуумного насоса й може використатися для напуску повітря у високовакуумний насос при висунутій рукоятці 12.

Вимір вакууму в підковпачній частині здійснюється за допомогою приладу ВІТ-2 (14). На лівій стійці закріплені органи керування вакуумною установкою 15. У підковпачній частині також перебуває підложкотримач і карусель 12, органи керування якої перебувають унизу стійки керування 17. У середині стійки керування розташований блок живлення 18 для магнетрона 19. В установці використовується магнетрон 19 із прямокутним катодом-мішенню. Магнетрон 19 закріплений вертикально - на стінці ковпака 5.

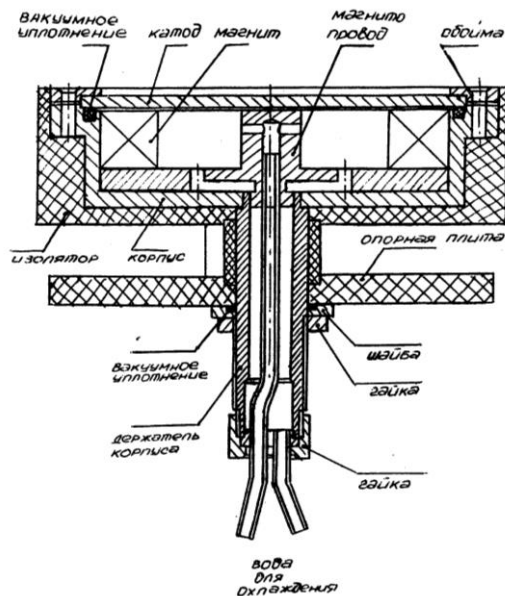


Рис. 5. Магнетронна система розпилення

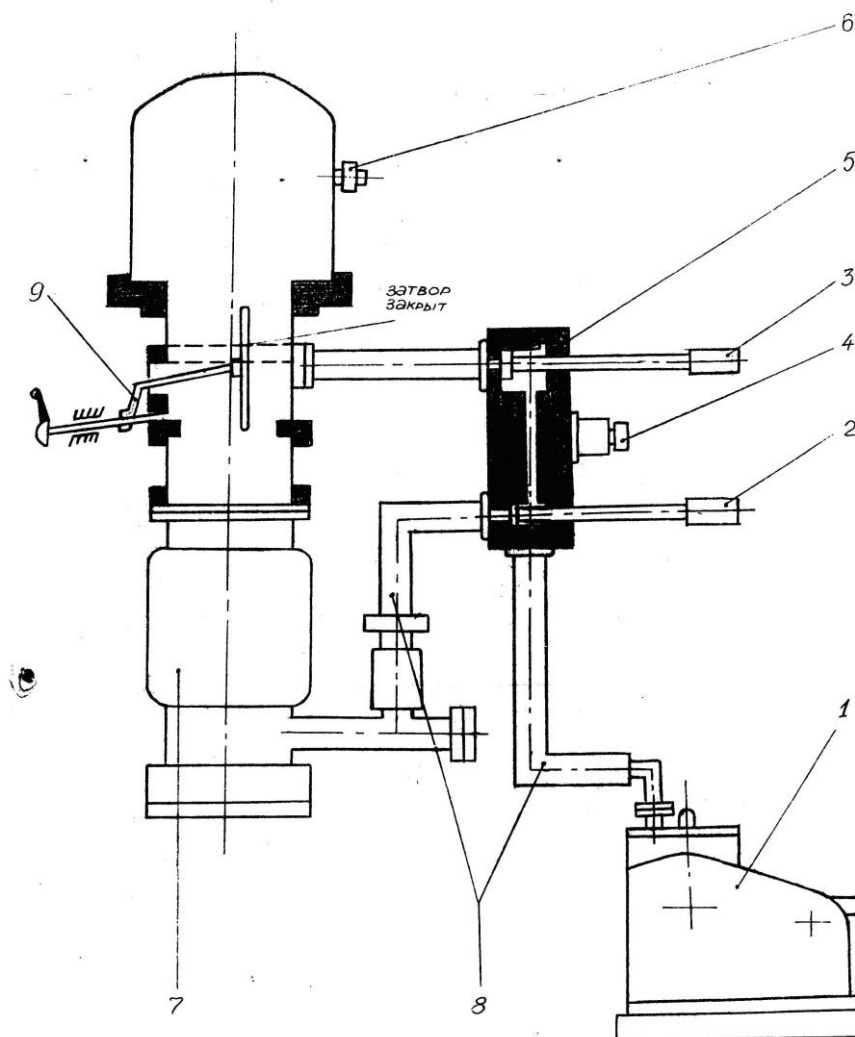


Рис. 6. Вакуумна система

1 - механічний насос НВР-5Д. 2 - ручка нижнього клапану, 3 - ручка верхнього клапану, 4 - електромагнітний натікач, 5 - клапанна коробка, 6 - натікач для швидкого напуску повітря, 7 - дифузійний паромасляний насос, 8 - трубопроводи, 9-затвор.

Блок живлення.

Блок живлення складається з 3-х частин: катодного вузла живлення, вузла живлення анода й системи підпалу.

Катодний вузол працює в такий спосіб: за допомогою системи керування СУ й семістора VS1 (рис. 7) відбувається плавне регулювання струму в первинній обмотці трансформатора Тр1. Згладжування пульсацій здійснюється за допомогою RC - ланцюга (R3C3 і R4C4) і дроселя Др1. Вихідна напруга - 400...1000 В при струмі 2...10 А.

Анодний вузол створює напруга зсуву на аноді (50...100 В) щодо корпусу установки.

Система підпалу призначена для запалювання розряду магнетрона. Вона складається з підвищувального трансформатора Тр3, діодного випрямляча й RC-ланцюга фільтра С6-Р8. Вихідна напруга системи підпалу 1,5 кВ. Діод VD призначений для розв'язки катодного вузла живлення й системи підпалу.

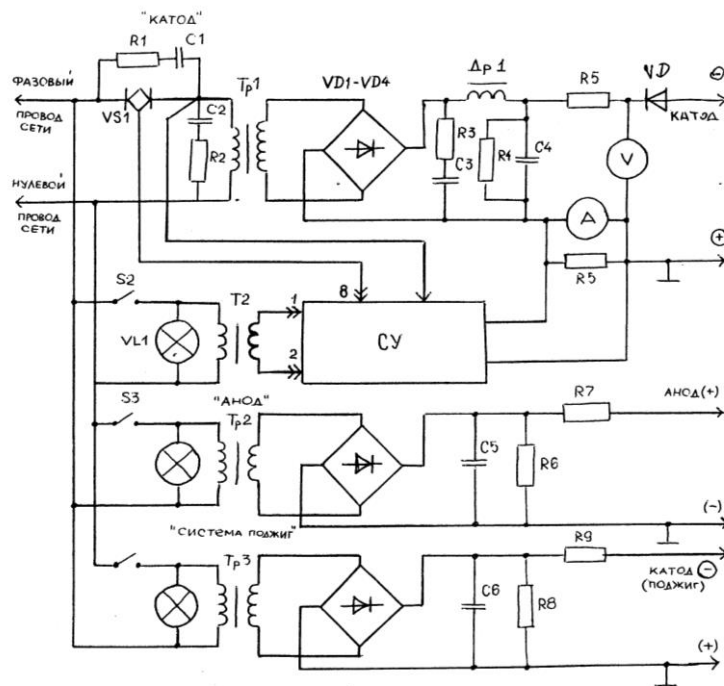


Рис. 7. Схема блоку живлення

Програма роботи.

1. Ознайомитися з описом установки типу УВН, що складається з вакуумного блоку, блоку живлення й керування, газомagnetронного пристрою.

2. Включити установку відповідно до інструкції. Опустити робочу камеру до заданого лаборантом тиску.

3. Встановити в камері тиск робочого газу за допомогою натікача рівний 0,15 Па.

4. Включити магнетрон і виміряти ВАХ магнетрона при даному тиску.

5. Повторити п.3 та п.4 при тисках 0,30 Па, 0,45 Па та 0,60 Па.

6. Побудувати сімейство вольт-амперних характеристик

Записати в протоколі результати спостережень і розрахунків і зробити висновки по роботі.

Вимоги до звіту:

Звіт має містити:

- завдання по роботі;
- ескіз електродної системи газомagnetрона и схему його включення;
- таблиці результатів досліду та графіки, опис результатів спостережень;
- висновки по отриманим результатам.

Контрольні питання

- Фізична сутність іонного (катодного) розпилення.
- Принцип дії магнетронних розпилювальних систем.
- Різновиди конструкцій магнетронних систем і катодних вузлів.

4. Як орієнтовані електричні й магнітні поля в магнетроні? Траєкторії руху електронів у цих полях.
5. Основні параметри магнетронних систем.
6. Пристрій вакуумної напилувальної установки. Основні елементи й вузли.
7. Вакуумна система установки. Засоби відкачки.
8. Особливості електричного живлення магнетрона.
9. Який вид електричного розряду використовується в магнетроні?
10. Переваги й недоліки магнетронного напилування плівок.
11. Які види плівок одержують за допомогою магнетронної системи?

Лабораторна робота № 2

БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Мета роботи: вивчити особливості та характеристики бар'єрного розряду.

Короткі відомості про бар'єрний розряд

Під бар'єрним розрядом в даний час розуміють різновидність тихого розряду, який виникає в газі атмосферного тиску під дією прикладеної до електродів змінної або імпульсної напруги, при цьому хоча б один із двох електродів повинен бути покритий діелектриком. Сама назва “бар'єрний розряд” була запропонована в кінці 60-х років минулого століття Е.Н. Єрьомінін і є в даний час загальною призначеною.

Початком досліджень бар'єрного розряду необхідно вважати перше десятиліття минулого століття. Детальний аналіз перших результатів вивчення цього явища приведені в книзі О.Глокера та С.Лінда (Electrochemistry of Gases and other Dielectrics. Wiley. New York, 1939), а також і в більш пізніших оглядових статтях (Р.Ланта та Ю.В.Філіппова)

Цей тип розряду характеризується, з одного боку, високою середньою енергією електронів, а з другого – низькою температурою газу, яка близька до температури електродів. При цьому енергія, яка вкладається в розряд виділяється в короткоживучих малоінтенсивних іскрах – мікророзрядах. Сукупність усіх цих умов робить бар'єрний розряд ефективним для проведення різноманітних реакцій (конденсації, синтезу, полімеризації та ін.). Найбільш широке застосування бар'єрний розряд знайшов в установках та апаратах синтезу озону для медицини, екології, біології, технології нанесення різних покриттів.

На рис.1 схематично показані електродні системи, в яких при подачі змінної або імпульсної високої напруги (десятки кВ) збуджується бар'єрний розряд.

Незважаючи на простоту цих конструкцій, в яких один або обидва електроди контактують з діелектричними бар'єрами, в розрядній зоні проходять досить складні процеси пов'язані, як з електричними явищами, так і з фізико-хімічними параметрами розрядного середовища і діелектрика. В зв'язку з цим на даний час не існує повного теоретичного опису цього явища.

Найбільші успіхи в цьому були досягнуті при феноменологічному представленні бар'єрного розряду, як нелінійного об'єкту електричного ланцюга. [1]. В основі такого підходу лежить заміна бар'єрного розряду деякою еквівалентною схемою до складу якої входять стандартні електротехнічні елементи: конденсатори, опори, генератори і інші. Різними авторами були запропоновані різні еквівалентні схеми, під час з великою кількістю елементів. Аналіз таких схем в тій, або іншій мірі підтверджували одержані експериментальні результати. Найбільш простою і наочною еквівалентною схемою, яка дає можливість проаналізувати поведінку струму і напруги в бар'єрному розряді і відобразити представлення про його вольт-амперну характеристику є схема показана на рис. 2.

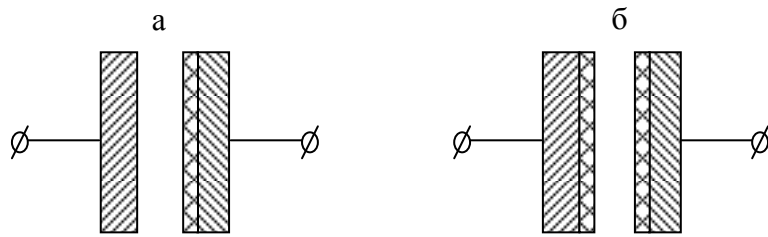


Рис.1. Схематична конструкція електродних систем з діелектричним бар'єром:

а – з одним бар'єром;

б – з двома бар'єрами.

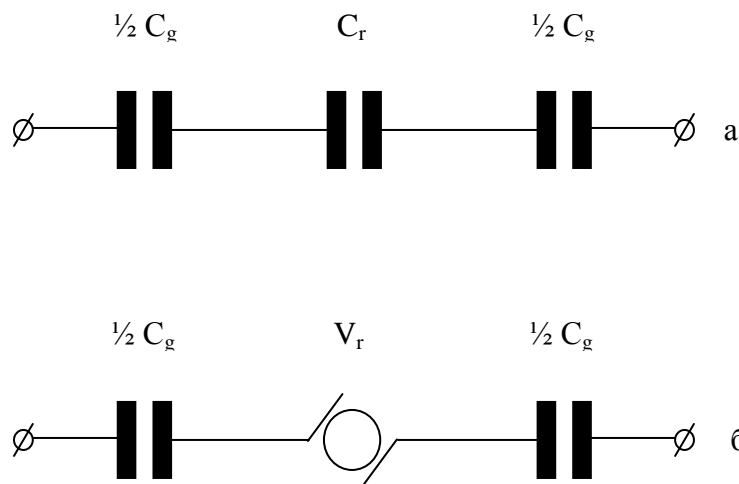


Рис.2. Еквівалентна схема електродної системи з діелектричним бар'єром:

а – при відсутності розряду;

б – при присутності розряду.

При живленні бар'єрного розряду синусоїдальною напругою найбільш зручно проводити аналіз електричних явищ. При необхідно виділити два періоди: перший – до досягнення напруги, яка відповідає напрузі виникнення розряду, другий – після виникнення розряду. В перший період струм через розряд визначається загальною ємністю електродної системи з діелектриком і розрядним проміжком, і в цьому випадку еквівалентна схема буде мати вигляд трьох послідовно з'єднаних конденсаторів, а при одному бар'єрі – двох конденсаторів з ємностями C_g і C_r (рис. 2а).

Після виникнення розряду величина струму буде визначатися ємністю діелектричних бар'єрів, а значення напруги на розрядному проміжку залишається практично постійним до моменту зникнення розряду. В цьому випадку еквівалентна схема має вигляд послідовно з'єднаних двох (або одного) конденсаторів і ЕРС зі знакозмінною напругою $\pm V_r$ (рис. 2б). Для наочності проаналізуємо електричні процеси в ланцюгу при живленні електродної системи з діелектричними бар'єрами від джерела високої напруги синусоїдальної форми. Так до виникнення розряду у відповідності з еквівалентною схемою (рис. 2а) миттєве значення напруги та струму на елементах електродної системи (електродах, діелектрику і розрядному проміжку) можна розрахувати за законами електротехніки.

$$V_g = V_0(C_{\text{заг}}/C_g)\sin(\omega t), \quad (1)$$

$$V_r = V_0(C_{\text{заг}}/C_r)\sin(\omega t), \quad (2)$$

$$I = V_0 C_{\text{заг}} \omega \cos(\omega t), \quad (3)$$

де V_0 – амплітудне значення напруги на озонаторі.

V_g і V_r – відповідно напруги на діелектричних бар'єрах та розрядному проміжку, I – струм через електродну систему, C_g , C_r , $C_{заг}$ – відповідно ємності діелектричних бар'єрів, розрядного проміжку та загальна ємність електродної системи:

$$C_{заг} = C_g C_r / (C_g + C_r) \quad (4)$$

В цей період вирази для середніх і ефективних значень струмів і напруг мають такий вигляд:

$$I_{еф} = V_0 \omega C_{заг} / \sqrt{2}, \quad (5)$$

$$I_{сер} = 2 V_0 C_{заг} \omega / \pi \quad (6)$$

Коли амплітудне значення напруги живлення на електродах досягне величини напруги виникнення розряду, в газовому проміжку з'являється активний електричний струм і криві струму та напруг будуть мати більш складний вигляд (рис. 3). З моменту виникнення розряду t_1 і до моменту його зникнення – досягнення напруги живлення свого амплітудного значення ($t=T/4$), напруга на розрядному проміжку у відповідності з еквівалентною схемою залишається постійною і рівною $\pm V_r$. Тоді вираз для напруги на діелектричному бар'єрі буде мати вигляд:

$$V_g = V_0 \sin(\omega t) - V_r \quad (7)$$

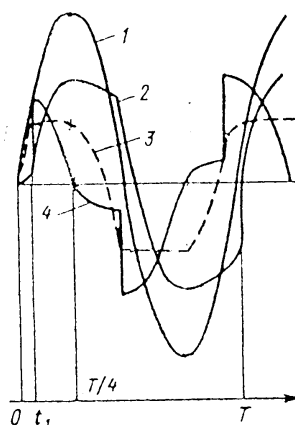


Рис.3. Форма струмів та напруг в бар'єрному розряді:

1. напруга на електродах;
2. напруга на діелектричних бар'єрах;
3. напруга на розрядному проміжку;
4. струм через електродну систему.

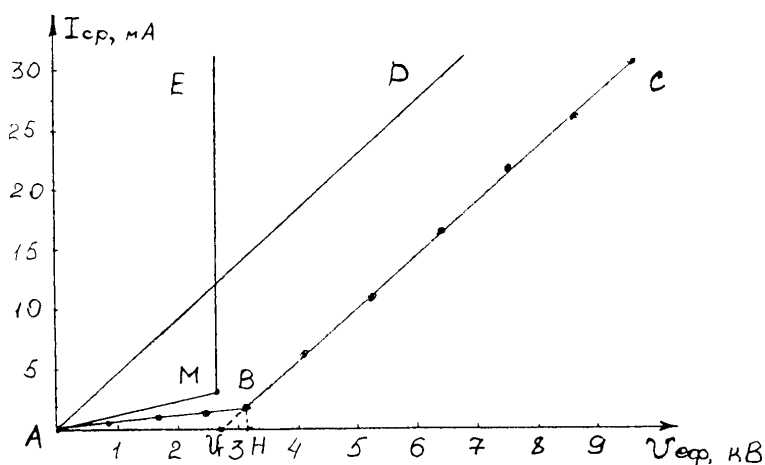


Рис.4. Зовнішня вольт-амперна характеристика бар'єрного розряду.

В цьому випадку струм через електродну систему буде рівним струму через діелектрик:

$$I = d(C_g V_g) / dt = V_0 C_g \omega \cos(\omega t) \quad (8)$$

Із порівняння виразів (3) і (8) видно, що при виникненні розряду спостерігається різка зміна струму, в зв'язку з тим, що $C_g > C_{заг}$.

На практиці зручніше користуватися ефективним і середнім значеннями струмів, які одержують інтегруванням виразів (3) та (8). Найбільш явно це питання розглянуто в роботі [2]. Вирази для струмів мають вигляд:

$$I_{ef} = V_0 \frac{C_g \omega}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{2A\omega T_p + A \sin \omega T_p - \pi(A-2)} \quad (9)$$

$$I_{cp} = (V_0 - V_r) \frac{2}{\pi} C_g \omega \quad (10)$$

де $A = \frac{C_r^2}{(C_g + C_r)} - 1$; $\omega T_p = \arcsin[1 - \frac{2V_r(C_r + C_g)}{V_0 C_g}]$; T_p – точка розриву кривої струму.

Ці вирази справедливі після виникнення розряду, коли напруга на електродах вища за напругу виникнення розряду (при $V_0 \geq \frac{V_r C_r}{C_{заг}}$). Із виразів (9) та (10) видно, що залежність I_{ef} від V_0 носить нелінійний характер, в той час як I_{cp} від V_0 – лінійний.

На рис. 3, крива 4 зображено інтегральний струм через електродну систему, який представляє собою суму струмів великої кількості короткоживучих мікророзрядів (~10нс), що хаотично виникають в розрядному проміжку заповнюючи весь його об'єм.

На рис. 4. показана вольт-амперна характеристика електродної системи з розрядним проміжком 1 мм. Перший відрізок АВ відповідає залежності $I_{сер} = f(U_{ef})$ при відсутності розряду в озонаторі. Озонатор в цьому випадку являє собою систему послідовно включених конденсаторів (C_r і C_g). Через це нахил цього ділянки характеристики визначається загальною ємністю електродної системи озонатора. Більш складна залежність спостерігається для відрізка характеристики, який відповідає періоду наявності розряду. Ця ділянка не завжди є лінійною, що залежить від багатьох факторів. Перш за все нерівномірність і неодночасність заповнення розрядом розрядного проміжку, викликані зміною характеристик діелектричного бар'єру при зміні струму. Крім цього нелінійність може бути зв'язана також з формою істинної характеристики розряду.

Розглянемо більш детально характеристику електродної системи з розрядним проміжком, відображену на рис. 4. Для порівняння на цьому рисунку показана вольт-амперна характеристика конденсатора з ємністю рівною ємності діелектричного бар'єру (AD), яка йде паралельно зовнішній характеристиці електродної системи при наявності розряду (BC), тобто характеристика AD при тому ж струмові відповідає падінню напруги на діелектричному бар'єрі. Таким чином, різниця напруг, яка визначається характеристиками BC та AD, являє собою по суті падіння напруги на розрядному проміжку, яке збільшується зі збільшенням його ширини. Залежність напруги на розрядному проміжку від струму при виникненні розряду має різкий злом (точка М на ламаній АМЕ). До виникнення розряду ця напруга росте пропорційно струму (відрізок АМ), при цьому пропорційність визначається загальною ємністю електродної системи (C_r і C_g). Після виникнення розряду напруга на розрядному проміжку залишається практично постійною і не залежить від сили струму (відрізок МЕ). Оскільки відрізок МЕ відповідає падінню напруги на розрядному проміжку при наявності розряду, то він по суті і є істиною вольт-амперною характеристикою розряду в даній електродній системі. Таким чином, форма цієї характеристики відображається через характеристику діелектричного бар'єру (ділянка AD) на формі зовнішньої вольт-амперної характеристики всієї електродної системи. Напругу горіння розряду в розрядному проміжку можна знайти продовженням зовнішньої вольт-амперної характеристики до перетину з віссю абсцис (V_r). Проекція точки В на вісь абсцис (точка Н) відображає повну напругу на електродній системі в момент виникнення розряду.

При проведенні аналізу не розглядалися питання пов'язані з впливом природи газу, а також його тиску на вольт-амперну характеристику бар'єрного розряду, оскільки в даному

випадку бар'єрний розряд використовується в озонаторах, де робочим газовим середовищем являється один газ (повітря або кисень) при тиску близькому до атмосферного.

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що величини напруг на газорозрядній електродній системі з діелектричним бар'єром та її елементах (діелектричному бар'єрі і газовому проміжку) можуть бути змінені за рахунок змін конструктивних параметрів системи (товщина діелектрика та ширина розрядного проміжку), а також електричних параметрів діелектричного бар'єру (діелектрична проникність), які в свою чергу впливають на електричні ємності елементів. В даному випадку перш за все для відчутного зниження відповідних напруг необхідно збільшити ємність діелектричного бар'єру, а також ємність розрядного проміжку. Збільшення ємності розрядного проміжку можна досягти за рахунок зменшення його величини. Але при використанні бар'єрного розряду для генерації озону необхідно створювати відповідний потік газу (повітря або кисню) через розрядний проміжок. В зв'язку з цим (в озонаторах малої та середньої потужності) його розмір встановлюють в межах 0,5 - 1,5мм, оскільки він обмежує вільний прохід газу при тиску близькому до атмосферного. Таким чином, залишається один елемент електродної системи – діелектричний бар'єр, де за рахунок зміни електричних і конструктивних параметрів можна досягти відчутного зниження напруги на озонаторі і підвищити його ефективність. Для цього необхідно підібрати матеріал діелектрика з високою діелектричною постійною і значно зменшити товщину самого діелектричного бар'єру.

Лабораторна установка

Лабораторна установка змонтована в металічному корпусі з передньою прозорою кришкою, що дозволяє візуально ознайомитись з електричною схемою та спостерігати за розрядом в розрядній камері.

До основного складу установки входять: високовольтний трансформатор (Тр), регулятор напруги (ЛАТР), високовольтний вольтметр С-96, міліамперметр змінного струму, розрядна камера (озонатор), обмежуючий опір. Спрощена електрична схема установки показана на рис.5. Основною складовою частиною установки є розрядна камера (озонатор), яка являє собою систему двох електродів, на одному з яких нанесений шар діелектрика. Одна з реальних розбірних конструкцій такого озонатора представлена на рис. 6

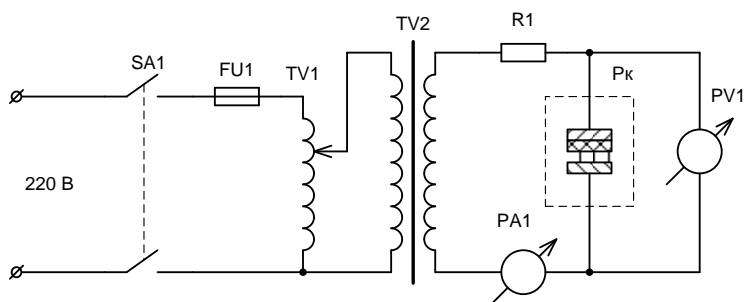


Рис.5. Принципова електрична схема лабораторної установки.

- SA1 – вимикач;
- FU1 – запобіжник;
- TV1 – автотрансформатор;
- TV2 – високовольтний трансформатор;
- PA1 – міліамперметр;
- PV1 – кіловольтметр;

Рк – розрядна камера (озонатор).

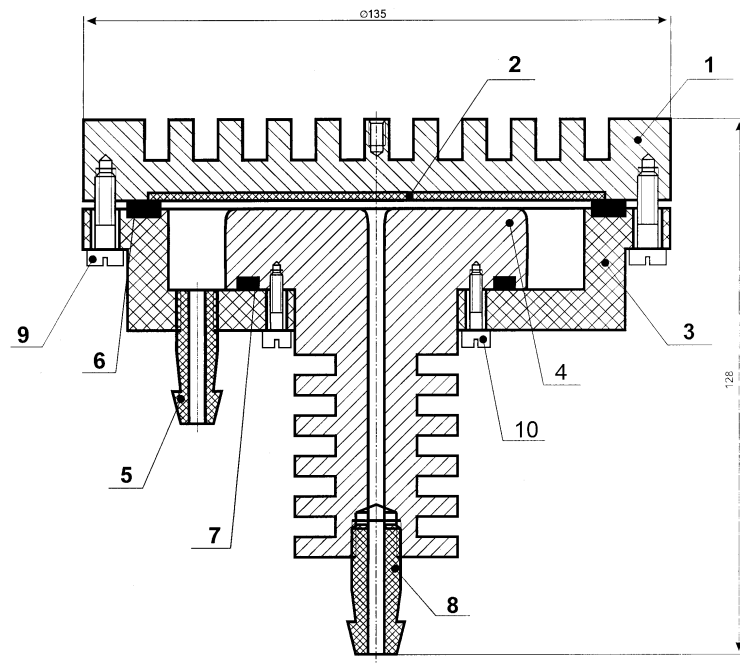


Рис.6. Озонатор з бар'єрним розрядом.

- 1, 4 – металеві електроди;
- 2 – діелектричний бар'єр (скло);
- 3 – ізолятор (органічне скло);
- 5, 8 – відповідно вхідний та вихідний штуцери;
- 6, 7 – фторопластові ущільнюючі кільця;
- 9, 10 – з'єднувальні гвинти.

Програма виконання роботи

1. Вивчити матеріали з бар'єрного розряду за науково-технічною літературою та ознайомитись зі змістом методичних вказівок.
2. Підготувати установку до проведення роботи. Для цього перевірити наявність підключення захисного заземлення, відсутність ушкоджень ізоляції ті шнура підводу живлення, а також елементів установки.
3. Ввімкнути внутрішнє освітлення установки і ознайомитися через прозору кришку з її електричною схемою.
4. Вивести ручку регулятора в крайнє ліве положення. Ввімкнути живлення переведенням вимикача в положення "Вкл".
5. Повільним поворотом ручки регулятора напруги за часовою стрілкою зафіксувати (візуально та за вимірювальними приладами) виникнення розряду в розрядній камері. Записати показання кіловольтметра і міліамперметра. Повернути ручку регулятора в нульове положення.
6. Послідовним поворотом і встановленням ручки регулятора напруги в різні положення змінювати напругу на електродах розрядної камери. Записати в таблицю значення напруги та струму розряду.

7. За отриманими даними побудувати вольт-амперну характеристику. З характеристики визначити напругу виникнення розряду (критичну напругу) та напругу горіння розряду.

Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

- ціль роботи;
- спрощену електричну схему установки;
- спрощену електродну конструкцію розрядної камери;
- короткий опис виконання роботи
- результати вимірів та розрахунки.

Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.

Контрольні питання

1. Основні ознаки бар'єрного розряду.
2. Умови та механізм виникнення та підтримки бар'єрного розряду.
3. Чим відрізняється бар'єрний розряд від інших типів розряду (тліючого, дугового, коронного)?
4. Як змінюються вольт-амперні характеристики від ширини розрядного проміжку?
5. Як впливає ємність розрядного проміжку та діелектричних бар'єрів на електричні параметри бар'єрного розряду (середній струм та напругу)?
6. Чим визначається потужність бар'єрного розряду?
7. Чому і яким чином в бар'єрному розряді синтезуються хімічно-активні сполуки?

Література

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.,: Наука,1987.
2. Мик Д., Крегс. Д. Электрический пробой в газах. – М.; Иностран.лит., 1960.
3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд.МГУ., 1989.
4. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М. Изд.МГУ. 1987.
5. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа. 1967.

Лабораторна робота № 3

ЗАСТОСУВАННЯ КОРОННОГО ТА БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В АПАРАТАХ ДЛЯ СИНТЕЗУ ОЗОНУ

Мета роботи: За науково-технічною літературою вивчити властивості озону, механізми та методи його синтезу. Ознайомитись зі структурою, електричними схемами, принципом роботи та характеристиками апаратів для синтезу озону з розрядними камерами (озонаторами) на коронному та бар'єрному розрядах. Ознайомитись з методами та приладами для вимірювання концентрації озону.

Короткі відомості про озон, механізм та методи його синтезу

Озон (O_3) є порівняно простою сполукою, одною з алотропічних видозмін кисню (O_2). Але незважаючи на те, що озон, як і кисень, складається з одних і тих же атомів (O), він значно відрізняється за своїми властивостями від O_2 .

Одною з основних властивостей озону, яка спонукала до його інтенсивного та широкого впровадження в техніці, біології, екології, медицині, є висока хімічна активність озону, а також його бактерицидна та фунгіцидна дія. Висока розчинність озону в воді також дала поштовх для його використання при обробці питної води та знезараження промислових стоків.

Озон у великих концентраціях є досить токсичною речовиною. В зв'язку з цим встановлена санітарна гранично допустима його концентрація в зоні обслуговування озонних апаратів та пристроїв, яка не повинна перевищувати $0,2 \text{ мг/м}^3$.

При взаємодії з речовинами озон, як метастабільна сполука, легко віддає один атом кисню і через те є дуже сильним окислювачем. Озон переводить в окисли майже всі метали (окрім Au і Pt) та металоїди, а також оксидує більшість неорганічних та органічних сполук.

Реакція переходу кисню в озон довільно проходити не може. Для її проходження необхідні затрати енергії. Зворотній же перехід (розпад озону) проходить вільно. Для взаємного переходу кисень \leftrightarrow озон характерна неповна оборотність, в результаті чого у кисні (або в повітрі) присутня деяка врівноважена кількість озону. Крім того, розпад озону проходить швидше при більш високих температурах.

Взагалі, рівновага синтезу озону та його розпаду при різних температурах може бути представлена наступною реакцією:



Таким чином для утворення озону необхідна відповідна кількість атомарного кисню в атмосфері молекулярного кисню.

Проте в нормальному стані при низьких температурах газ в основному складається з молекулярного кисню, а при високих - з атомарного, і немає такої області температур при одній атмосфері, де рівноважний парціальний тиск озону був би значним. Так, максимальний парціальний тиск озону, який маємо при температурі 3500°K , складає всього $9 \cdot 10^{-7} \text{ атм}$.

Через це, для одержання значних концентрацій озону необхідне одночасне створення двох умов:

— порівняно низька температура, яка забезпечує перевагу в утворенні озону порівняно з його розпадом,

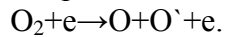
- присутність великих концентрацій атомарного кисню.

Виконання цих умов можливе при низьких температурах в результаті різних сторонніх нетермічних впливів на газ (опромінення, електронних процесів, деяких хімічних реакцій, тощо), які обумовлюють виділення атомарного кисню.

В зв'язку з цим на даний час відомі наступні основні способи утворення озону з кисню [1]:

- термічний,
- під дією хімічних реакцій,
- фотохімічний,
- електрохімічний,
- під дією потоку часток,
- в електричних розрядах.

Незважаючи на таку широку гаму способів синтезу озону, з погляду багатьох дослідників найбільш уваги заслуговують способи синтезу в електричних розрядах (тихому, тліючому, коронному, дуговому та іскровому), які дозволяють одержати найбільш високий енергетичний вихід озону (г/кВт · год). Багатьма дослідниками встановлено, що основним процесом при синтезі озону в газовому розряді, що приводить до утворення активних часток, є дисоціація молекул кисню на атоми при зіткненні з електронами:



Для практичних цілей синтезу озону найбільш перспективним є тихий розряд, який об'єднує в собі ряд різновидів (з вістря, бар'єрний, ковзний та інші).

В даний час в потужних установках синтезу озону (озонаторах) використовується в основному бар'єрний розряд, який збуджується під дією високої змінної напруги між двома циліндричними або плоскими електродами, при тисках газу близьких до атмосферного. Один з таких електродів зі сторони розрядного проміжку покритий шаром діелектрика товщиною ≤ 1 мм (скло, склоемаль та інші). В зв'язку з цим для реалізації розробки генератора озону порівняно невеликої концентрації (до десятків грам на куб. метр) для впровадження в медицині, а також в техніці, біології та екології, об'єктом дослідження стали системи з бар'єрним розрядом та розрядом з вістря. Деякі теоретичні, а також експериментальні аспекти фізики бар'єрного розряду досить непогано розглянуті в книзі [2]. В зв'язку з цим нижче буде розглянуто питання синтезу озону за допомогою бар'єрного розряду.

Синтез озону з кисню в бар'єрному розряді

Електросинтезу озону в бар'єрному розряді притаманні дві основні особливості: це, по-перше, залежність виходу продукту від електричних параметрів, і, по-друге, відтворення, як правило, таких процесів в потоці газу. Досить складна багатофакторна природа електричних процесів в бар'єрному розряді обумовлює такий же характер залежності кінетики синтезу від умов експерименту. Вірогідно, що найбільш загальним електричним параметром, який обумовлює інтенсивність електрохімічних процесів, повинен бути заряд, перенесений через розрядний проміжок за одиницю часу, або середній струм.

Якщо припустити, що в бар'єрному розряді напруга горіння є величина приблизно постійна, то можна вважати, що активна потужність буде пропорційна середній величині середнього активного струму. Таким чином, вихід продукту (озону) буде обумовлений в основному величиною енергетичного вкладу в одиницю об'єму газу, і знаходиться в прямій залежності від середнього струму розряду при інших рівних умовах. З урахуванням того факту, що реакція проходить в потоці, питомий енергетичний вклад може бути записаний як відношення активної потужності до об'ємної швидкості газу. Дійсно, кінетичні криві електросинтезу озону, одержані незалежно рядом дослідників при різних значеннях потужності (P) та об'ємній швидкості газу (V) при інших рівних умовах, описуються одною кривою (рис. 1) при використанні фактора

(P/v) , введеного групою авторів (С.С. Васильєвим, Н.І. Кобзєвим та Е.Н. Єрємїним) ще в 1936 році [1-3].

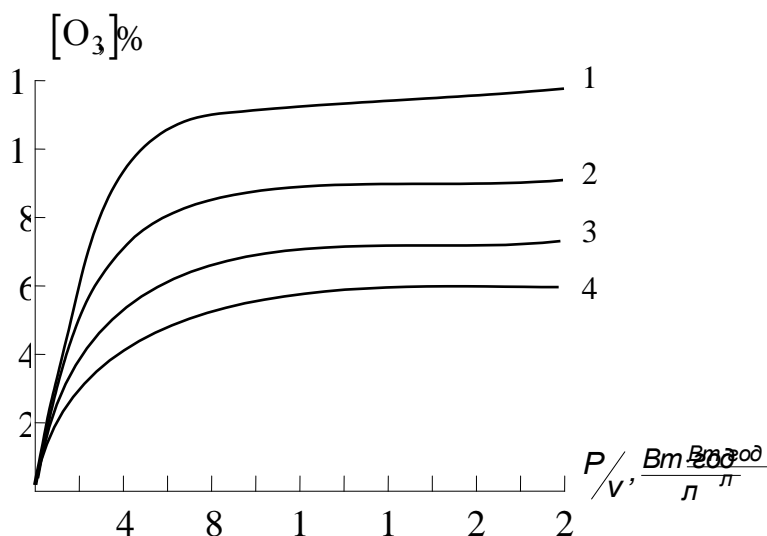


Рис.1. Кінетичні криві синтезу озону в озонаторах з різними розрядними проміжками при постійній потужності [3]. Розрядні проміжки d (мм): 1 – 1; 2 – 2,1; 3 – 2,9; 4 – 4,2.

Криві такого виду можуть бути описані кінетичним рівнянням оборотної реакції з нульовим або першим порядком з утворення озону та першим порядком з його розкладу [3]. В першому випадку рівняння має вигляд:

$$\frac{dC}{dt} = K_0 - K_1 \cdot C + D_0 \frac{d^2C}{dy^2}, \quad (1)$$

де C - концентрація озону,

D_0 - коефіцієнт поздовжньої дифузії,

y - координата вздовж потоку,

K_0 та K_1 - відповідно константи синтезу та розпаду озону.

Враховуючи, що ці величини пропорційні питомій потужності розряду, можливо одержати два асимптотичних рішення рівняння (1):

$$C = C_{ст} \left(1 - e^{-K_1 \frac{P}{v}} \right), \quad (2)$$

$$\text{де } C_{ст} = \frac{K_0}{K_1}, \text{ та } C = \frac{K_0 \cdot (P/v)}{1 + (K_1/v)}. \quad (3)$$

Перше з них відповідає випадку відсутності поздовжньої дифузії в реакторі, а друге - нескінченно великій швидкості поздовжньої дифузії.

Константи, які входять в рівняння (2) та (3) не залежать від фактора питомої потужності. Необхідно замітити, що вказані співвідношення вірні лише при умові, що K_0 та K_1 постійні по довжині реакційної зони.

Проте рівняння (3) більш зручне для кінетичних розрахунків на практиці. Експериментально встановлено, якщо фактор P/v змінюється тільки за рахунок варіації швидкості потоку газу при постійній потужності, то кінетичні криві асимптотично

наближаються до граничного значення. Але коли змінюється потужність, то на кривих виявляється максимум (рис. 2) [3]. Таке поведіння кривих може бути пояснене підвищенням температури газу в зоні розряду. Вираз (3) може бути використано для кінетичних кривих (рис. 1) і в цьому випадку, якщо врахована залежність кінетичних констант (K_0 та K_1) від температури газу.

Таким чином, необхідно пам'ятати, що зміна фактора P/v може проходити одночасно зі зміною інших умов. Константи K_0 та K_1 , які не залежать від фактора P/v , можуть залежати від таких параметрів, як тиск та температура газу, величина розрядного проміжку, частота напруги живлення, склад газового середовища.

На даний час є підстави рахувати, що підвищення частоти живлення бар'єрного розряду до $7 \div 10$ кГц призводить до значного підвищення виходу озону на одиницю площі електродів [3]. Так в промисловому озонаторі для очистки води при частоті живлення 50 Гц вихід складає $\approx 0,5$ г/год·дм² то при частоті 600 Гц він досягає вже 3 г/год·дм², а в експериментальному реакторі при ідеальних умовах і ефективному охолодженні електродів на частоті 5 кГц він може досягати 50 г/год·дм². Можна сказати, що в даному випадку вплив частоти виражається через активну потужність. При вищих частотах (сотні кілогерц) вихід озону дещо зменшується і при частотах >1 МГц простежується різке його зменшення. Це явище трактується рядом дослідників досить складною взаємодією електронів та іонів в розрядній зоні і на поверхні електродів, що приводить до термалізації плазми і падінню ефективності синтезу озону.

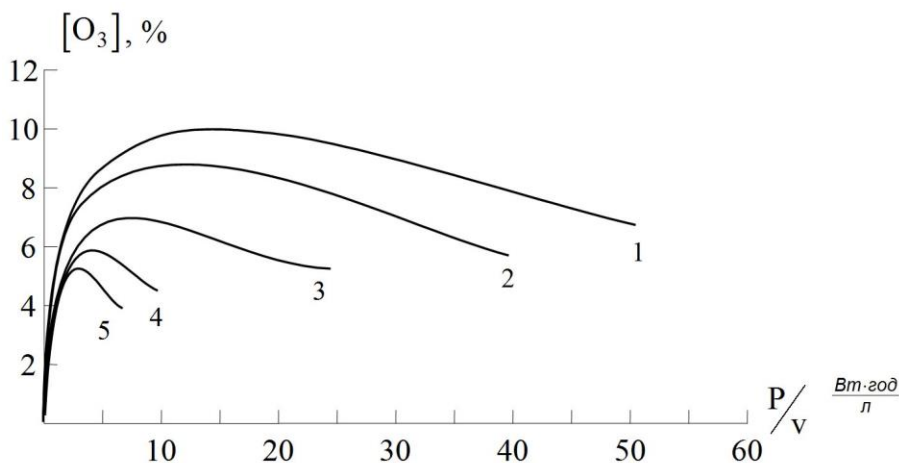


Рис.2. Залежність концентрації озону від величини фактора питомої потужності P/v при різних швидкостях потоку кисню у бар'єрному розряді (л/год) [3]: 1 – 3; 2 – 6; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 30.

Тиск газу та величина розрядного проміжку являються також відчутними параметрами, варіацією яких можливо впливати на ефективність виходу озону, перш за все через зміну констант синтезу та розпаду озону в рівнянні (3).

Зміна величини розрядного проміжку d призводить до появи складної залежності кінетичних констант від d . Так, при малих d наявний ріст K_0 з максимумом при $d \approx 1$ мм, а потім настає повільний спад.

Встановлено, що тиск в межах $0,3 \div 1$ атм практично не впливає на енергетичний вихід озону, і при підвищенні його до 5 атм зменшує цей вихід більш чим в 2 рази.

Таким чином, для практичних цілей можуть бути рекомендовані наступні величини параметрів:

- тиск $1 \div 2$ атм,
- розрядний проміжок $1 \div 3$ мм.

Ще в ранніх дослідях було встановлено, що вологість негативно впливає на утворення озону. Проте дані про вплив вологи на кінетику його електросинтезу відтворюються досить погано. Відомо, що малі добавки (0,001 г H_2O на 1 г кисню) практично не впливають на концентрацію O_3 , і лише при великих парціальних тисках парів води (одиниці мм.рт.ст. і більше) концентрація різко падає. При цьому доведено, що підвищення вологості змінює характер розряду і зменшує поверхневий опір діелектрика, що в кінцевому результаті приводить, при інших рівних умовах, до зниження виходу O_3 .

На даний час розроблені потужні стаціонарні промислові озонатори на бар'єрному розряді (десятки-сотні кіловат), які з успіхом використовуються для підготовки питної води [1]. Такі озонатори мають в основному трубну конструкцію, яка являє собою коаксіальну систему електродів з діелектричним бар'єром із склоемалі, котра наноситься на робочу поверхню одного з електродів. Для підвищення продуктивності з виходу озону (до декількох кілограмів на годину) часто в озонаторних установках використовують багатотрубні озонатори, або практикують паралельну роботу декількох озонаторів. В зв'язку з великою потужністю і виділенням великої кількості тепла на електродах таких озонаторів, вони потребують інтенсивного водяного охолодження.

Для переносних апаратів для генерації озону з порівняно невеликою концентрацією (до десятків грамів на куб. метр) і продуктивністю (одиниці грамів на годину) для використання в багатьох областях медицини, біології, техніки та ін. розроблені малогабаритні озонатори, як трубної (коаксіально-циліндричної), так і планарної конструкції, де в якості діелектричних бар'єрів використовується скло та склоемалі, а також інші діелектрики, наприклад покриття із SiO_2 . Схематичні конструкції двох із них показані на рис. 3 та 4.

Склад та принцип роботи апаратів для синтезу озону

Озонотерапевтичний апарат з озонатором на бар'єрному розряді.

Апарат виконаний у вигляді переносного настільного блоку в металічному корпусі, який з допомогою гнучких полімерних шлангів з'єднується з системою газового живлення (компресором або кисневою мережею чи балоном) та об'єктом використання озону.

На передній панелі апарата розташовані: тумблер вмикання та вимикання живлення, світловий індикатор, регулятор струму розряду, індикатор струму, ротаметр (регулятор та вимірник потоку газу), штуцер для підводу кисню або повітря, штуцер виводу озono-кисневої або озono-повітряної суміші.

Електрична схема апарата (рис. 5) являє собою транзисторний генератор пакетів імпульсів, на виході якого підключений високовольтний трансформатор. З трансформатора високовольтні імпульси подаються на електроди розрядної камери (озонатора). Амплітуда високовольтних імпульсів ($\approx 15\text{kV}$) є незмінною. Струм розряду може регулюватись зміною частоти імпульсів в схемі формування імпульсів або тривалістю пакетів цих імпульсів – в схемі формування пакетів, відповідними змінними резисторами (на передню панель виведена ручка регулятора тривалості пакетів).

Розрядна камера (озонатор на бар'єрному розряді) в даному апараті має коаксіально-циліндричну конструкцію, основою якої є скляна трубка з товщиною стінки 1 мм (діелектричний бар'єр). На зовнішню поверхню трубки нанесено металічне покриття, яке є одним із електродів озонатора. Другий (внутрішній) циліндричний електрод розміщений коаксіально по вісі трубки. З торців трубки розміщені ізолятори зі штуцерами для вводу та виводу газу. Один із штуцерів, який виготовлений із металу, є одночасно високовольтним виводом внутрішнього електроду.

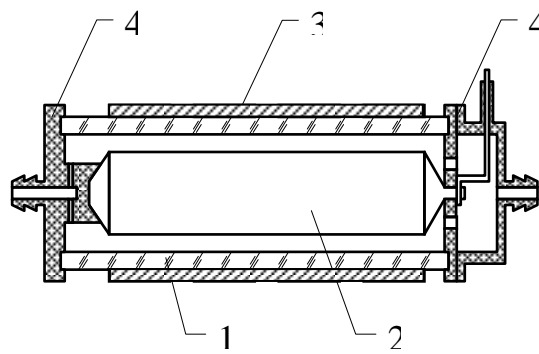


Рис.3. Коаксіально-циліндрична (трубна) конструкція озонатора з бар'єрним розрядом:

1. скляна трубка (діелектричний бар'єр)
2. внутрішній електрод;
3. зовнішній електрод;
4. ізолятори.

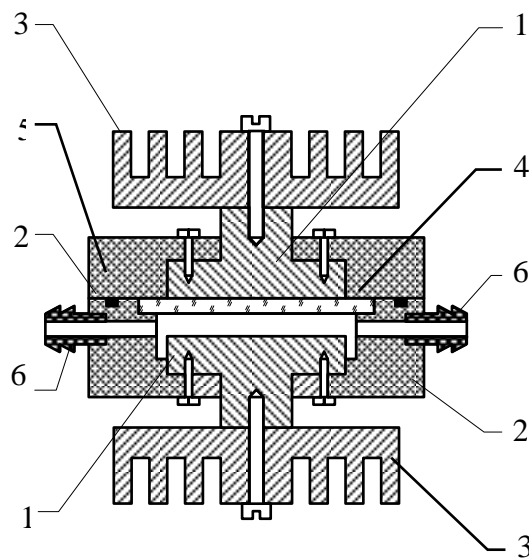


Рис.4. Схематична конструкція малогабаритного планарного озонатора з бар'єрним розрядом: 1 – плоскі електроди, 2 – корпус-ізолятор, 3 - радіатор, 4 – скляна пластина, 5 – ізолятор, 6 – штуцер.)

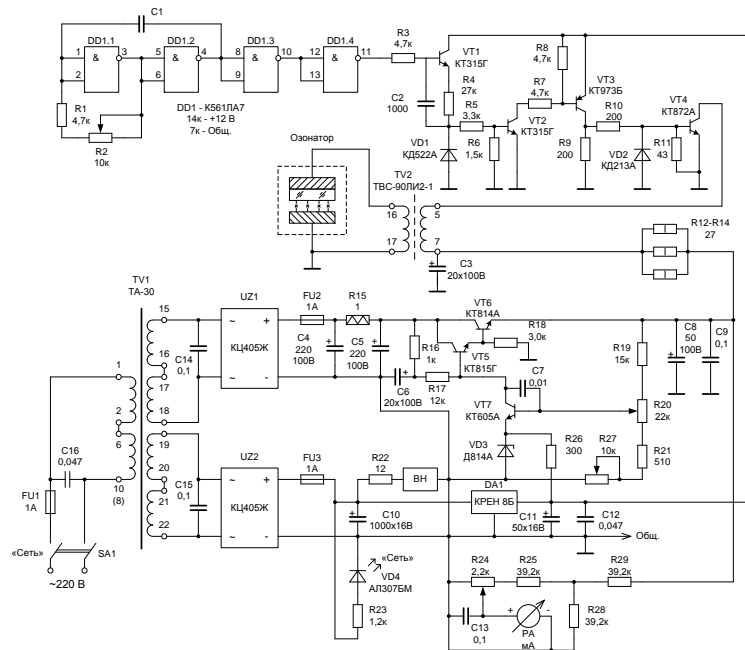


Рис.5. Принципова електрична схема озонотерапевтичного апарату з озонатором бар'єрного розряду.

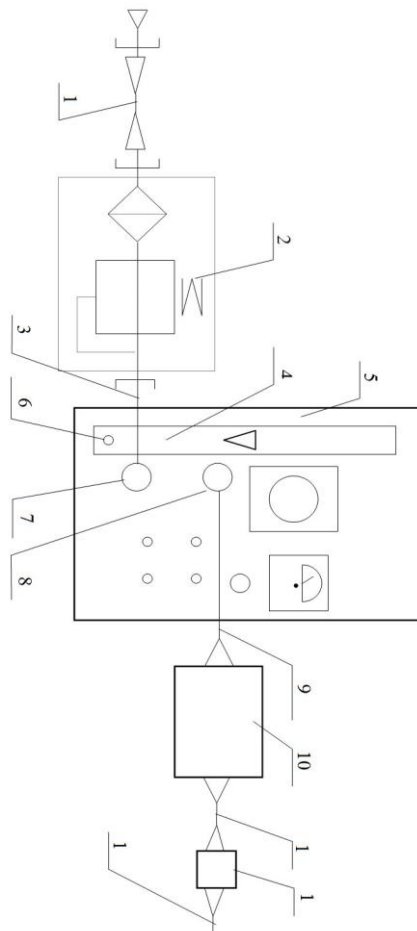


Рис.6. Схема активатору кисня для озонотерапії:

- 1,3,9,11,13 – шланги газові;
- 2 – редуктор РДФ-3-1;
- 4 – ротаметр;
- 5 – електронний приладовий блок апарату;
- 6 – регулятор витрат (протоку) кисню;

- 7 – вхідний штуцер апарату;
8 – вихідний штуцер апарату;
10 – лікувальна камера-ізолятор;
12 – руйнівник озону.

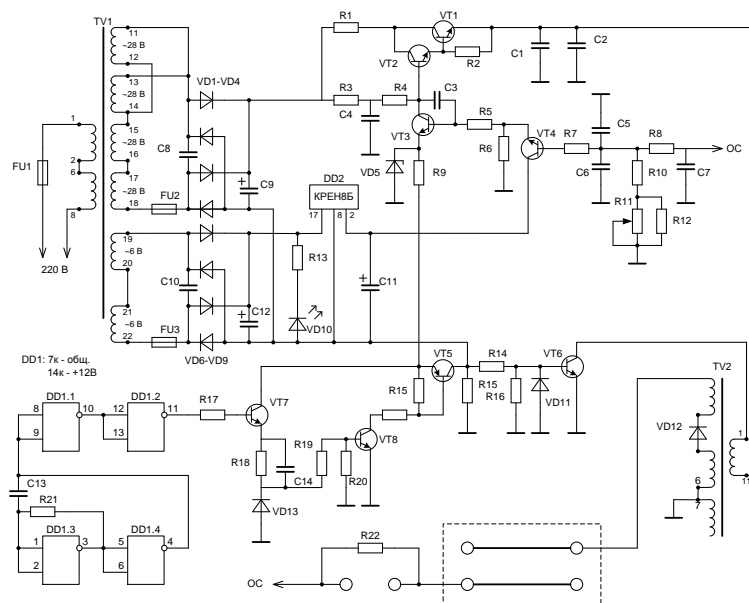


Рис.7. Принципова електрична схема озонного апарату для знезараження повітря.

Описаний апарат призначений в основному для використання в медичній практиці (газації уражених ділянок тіла пацієнта, озонних введень в порожнини та ін'єкцій, обробки води, масел та рідких ліків). Крім того подібні апарати можуть бути використані в інших областях (біології, технологічній обробці поверхонь деталей виробів та ін.), де необхідні порівняно невисокі концентрації озону (одиниці-десятки г/м³)

На рис. 6 наведено структурну схему для озонотерапії з використанням даного апарату, робота якої полягає в наступному. На вхідний штуцер 7 апарату 5 з системи газового живлення через редуктор – регулятор тиску (РДФ-3-1) 2 надходить кисень. Регулятором редуктора встановлюється надлишковий тиск на його виході (0,5–1 атм.). Ручкою регулятора потоку газу 6 на шкалі ротаметра 4 встановлюється необхідна для конкретної процедури швидкість потоку кисню (л/хв.), яка визначається за допомогою градуальної кривої (рис. 8) та ручкою регулятора струму (на рис. не показана) відповідний струм розряду.

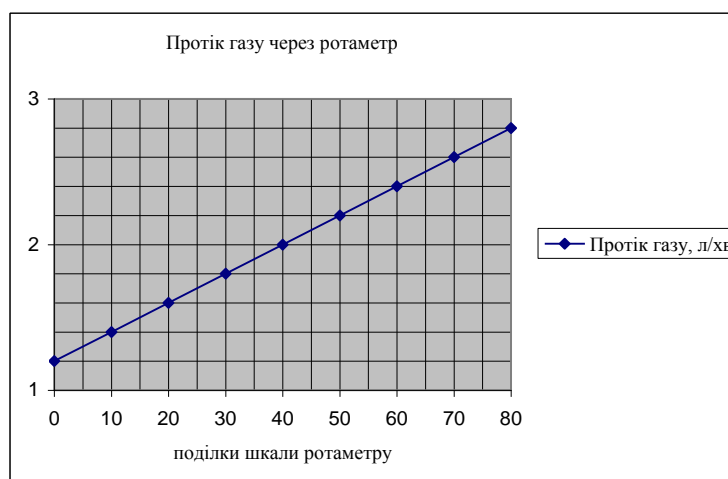


Рис.8. Градувальна характеристика ротаметру.

Оскільки концентрація озону на виході залежить від швидкості потоку кисню та струму розряду, то значення цих параметрів в кожному окремому випадку встановлюється за відповідними градувальними таблицями чи графіками. (При градуванні для вимірювання концентрацій озону використовується вимірювач типу “Циклон –5.41”). З озонуючої камери апарату 5 через вихідний штуцер 8 озono-киснева суміш по шлангу 9 подається до блоку газових комутаторів, а далі у лікувальну камеру-ізолятор 10, що герметично закріплюється на тілі пацієнта. Усередині порожнини камери розміщується та частина тіла пацієнта, котру необхідно обробити озono-кисневою сумішшю. Камера 10, яка виготовлена з тонкої полімерної плівки, за декілька хвилин роздувається до рівноважного об'єму. Надлишковий газ з лікувальної камери-ізолятора 10 відводиться самопливом по шлангу 11. Роздування камери-ізолятора 10 відбувається під дією тиску газового потоку з шланга 9 і внаслідок наявності газового опору в шлангу 11. Надмірний тиск газу у лікувальній камері-ізоляторі у рівноважному стані не набагато вищий атмосферного, тому не відбувається витоку озону з камери.

По шлангу 11 відпрацьований газ подається у руйнівник озону 12. Потім дезактивований газ по шлангу 13 виводиться за межі лікувального приміщення. Руйнівник озону 12 являє собою патрон з штуцерами для приєднання шлангів. Усередині його знаходиться гранульоване активоване вугілля, на частках якого адсорбується озон, перетворюючись у звичайний кисень.

Шланги герметично приєднуються до частин апарату за допомогою штуцерів з ребристою поверхнею, які забезпечують герметичність місць приєднання.

Озонний апарат для знезараження атмосфери приміщень з озонатором на коронному розряді.

Апарат виконаний в пластмасовому корпусі з вхідним і вихідним загратованими вікнами.

Електрична схема апарату змонтована на діелектричній основі і розділена перегородкою на дві секції. В першій секції розміщено високовольтний блок живлення, а в другій сама електродна система резонатора. В середній частині перегородки вмонтований вентилятор, який прокачує повітря, що поступає до вхідного вікна в корпусі апарату через фільтр та зону розряду, до вихідного загратованого вікна. З вихідного вікна надходить назовні активна озono-повітряна суміш, що має знезаражувальні властивості.

Електродна система являє собою систему з двох молібденових проволочок 0,1 мм, натягнутих на ізоляторах паралельно, на відстані 25-30 мм одна від одної.

На електроди подається висока постійна напруга 20-25 кВ, при якій виникає і підтримується коронний розряд. В зоні коронного розряду проходить процес синтезу озону.

Електрична схема блоку живлення (рис. 7) складається з двох основних вузлів: транзисторного генератора імпульсної напруги, на виході якого підключений блок високовольтного імпульсного трансформатора з випрямлячем (ТДКС-19), з якого знімається висока напруга і подається на електродну систему. Регулювання величини струму розряду і, відповідно, концентрація озону на виході забезпечується змінним опором (470 кОм), який змінює частоту імпульсів генератора.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з відомостями про озон та його властивості, а також дію озону на біологічні об'єкти. Вивчити механізми синтезу озону в газових розрядах та ознайомитись з інструкцією експлуатації вимірювача концентрації озону “Циклон – 5.41”.

2. При зняттю корпусі озонотерапевтичного апарату ознайомитись зі складом та його принциповою схемою, а також схемою газового живлення апарату. Ознайомитись з будовою розрядної камери (озонатора).

3. Встановити шасі апарата в кожух і закріпити гвинтами. Заземлити апарат. Перевірити відсутність зовнішніх ушкоджень апарата та шнура живлення.

4. За допомогою полімерних шлангів з'єднати апарат із схемою газового живлення та вимірювачем концентрації озону "Циклон – 5.41". Перевірити відсутність ушкоджень та перегинів шлангів. Ознайомитись з інструкцією експлуатації вимірювача концентрації озону.

5. Повернути ручку регулятора потоку ротаметра на передній панелі на 1-2 оберти вліво.

6. Відкрити вентиль кисневого балону і встановити на виході регулятора балону тиск приблизно 4 – 5 атм.

7. Ручкою регулятора редуктора – стабілізатора тиску РДФ – 3 – 1 встановити на виході апарата надлишковий тиск кисню в межах 0,05 - 0,1МПа. Після цього ручкою регулятора потоку встановити фіксовану швидкість потоку (≈ 2 л/хв.)

8. Включити апарат переводом тумблера в верхнє положення, при цьому повинен засвітитися індикатор на передній панелі.

9. Послідовним поворотом ручки регулятора струму встановлювати різні значення струму. Записати в таблицю величини струму та відповідні значення концентрації озону, які відображаються на світловій панелі вимірювача. Провести вимірювання концентрацій озону ще при двох – трьох значеннях потоку (1,5; 2; 2,5 л/хв.) і побудувати відповідні графічні залежності концентрації С (л/хв.) від струму І (мА).

10. При знятій верхній кришці апарата для знезараження повітря ознайомитись зі складом та його принциповою схемою. Візуально перевірити відсутність ушкоджень шнура живлення та складових елементів апарата.

11. В присутності викладача чи лаборанта ввімкнути вилку шнура живлення в розетку. Спостерігати за світінням розряду біля проволкових електродів та зміною інтенсивності та товщини шару світіння і зміною струму розряду, що регулюється відповідним потенціометром в схемі живлення електродів. За характерним запахом озону перевірити протягом не більше 1 хвилини наявність реакції синтезу озону в коронному розряді.

12. Вимкнути апарат і закрити герметично його верхню кришку. Ввімкнути апарат і виміряти концентрацію озону безпосередньо біля вихідного вікна апарата при фіксованому значенні розрядного струму. Вимірювання провести вимірювачем "Циклон – 5.41" при підведенні вхідного шлангу вимірювача безпосередньо до вихідного вікна апарату.

Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.

Вимоги до звіту

Звіт повинен вміщувати:

1. Ціль даної роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Структурну схему озонотерапевтичної установки.
4. Рисунок коаксіально-циліндричної конструкції озонатору з бар'єрним розрядом.
5. Результати вимірів (таблиці, графіки).
6. Висновки по роботі.

Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.

Контрольні питання

1. Основні властивості озону. Чим він небезпечний?
2. Методи синтезу озону.
3. Механізм синтезу озону в електричних розрядах.
4. Чому бар'єрний розряд найбільш сприятливий для синтезу озону?
5. Що таке гранично допустима концентрація озону та її величина?
6. Які сполуки крім озону синтезуються в повітряному середовищі при наявності коронного чи бар'єрного розрядів?
7. Особливості використання озону.
8. Як впливає температура кисню та наявність вологи на інтенсивність синтезу озону?
9. Схематична конструкція електродних систем озонаторів.
10. Структурна схема озонотерапевтичної установки.

Література

1. Филипов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. – М.: Изд.МГУ, 1987.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд. МГУ, 1989.
3. Современные приборы физической химии (Под ред. В.И.Герасимова и П.А.Апишина. – М.: Химия, 1968)
4. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно – ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
6. Кузьмичев А.І., Крижанівський В.І., Денбовецький С.В., Дрозд І.В. та ін. Техніка та технологія озонотерапії. Український журнал медичної техніки та технології. №1, 1994г.
7. Кузьмичев А.І., Крижанівський В.І., Денбовецький С.В., Дрозд І.В. та ін. Озонотерапевтичні комплекси. Український журнал медичної техніки та технології. №1, 1994г.
8. Денбовецький С.В., Ціделко В.Д., Кузьмичев А.І Озонатор коронного розряду. Патент України №35972А. Надрукований 16.04.01, бюл. №3
9. Денбовецький С.В., Ціделко В.Д., Кузьмичев А.І Озонатор з бар'єрним розрядом. Патент України №40273А. Надрукований 16.07.01, бюл. №6

Лабораторна робота № 4

ГАЗОРОЗРЯДНІ ЛЮМІНІСЦЕНТНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Мета роботи: ознайомитись з принципом роботи, конструкціями, характеристиками, способами живлення газорозрядних люмінесцентних джерел світла.

Програма роботи

1. Ознайомитись з принципом дії люмінесцентних ламп.
2. Ознайомитись з явищем люмінесценції, що викликано випромінюванням газового розряду; видами люмінофорів.
3. Вивчити методи ініціювання розряду в люмінесцентних лампах.
4. Ознайомитись з конструкціями газорозрядних індикаторних та освітлювальних люмінесцентних ламп.
5. Ознайомитись з типовими схемами баластів та їх роботою.
6. Вивчити вплив різних способів живлення ламп (ВЧ та НЧ) на пульсації світлового потоку.
7. Зняти вольт-амперні характеристики тліючого розряду газорозрядних люмінесцентних ламп.

Теоретичні відомості

1. До газорозрядних люмінесцентних джерел світла відносяться плазмові (іонні) прилади тліючого, дугового, іскрового, високочастотного розрядів, що випромінюють світлову енергію з потрібною спектральною характеристикою та використовують явище люмінесценції. Вони широко використовуються в народному господарстві, і не тільки при освітленні приміщень та навколишніх територій, а також в устаткуванні для фотолітографії, бактерицидній апаратурі, як сигнальні елементи та інше [2].

Для отримання світлової енергії випромінювання використовують світіння інертних газів або парів деяких металів, що виникає під дією проходження електричного струму через них. Для ефективного випромінювання світлової енергії підбирається оптимальний тиск газу, що використовується, чи парів металу і режим електричного розряду. Для одержання необхідного спектра випромінювання підбирається склад газів, парів металу чи люмінесцентного покриття.

Газорозрядні прилади за принципом випромінювання поділяються на три групи: прилади з безпосереднім випромінюванням тліючого, дугового розрядів, люмінесцентні прилади й імпульсні прилади іскрового розряду.

У приладах тліючого розряду використовується світіння газу, через який проходить електричний струм. До них відносяться неонові лампи.

До приладів з безпосереднім випромінюванням відносяться прилади, через які проходить струм в режимі тліючого розряду, наприклад неонові лампи; ртутно-кварцові, натрієві лампи (в основному ультрафіолетової ділянки спектра), у яких використовується тліючий розряд або дуговий розряд у парах ртуті та натрію. Застосовуються в медицині, світлокопіювальній техніці і фотографії для накачки лазерів, кінотехніці.

У люмінесцентних приладах, що працюють за принципом подвійного перетворення енергії, використовується розряд в газах або електричний розряд у парах металів (ртуті, натрію). Енергія тліючого розряду діє на спеціальне люмінесцентне покриття в середині лампи, що випромінює енергію у видимій частині спектра. Енергія електричного розряду в парах ртуті перетворюється в ультрафіолетову променисту енергію визначеної довжини хвилі

(електролюмінісценція). Люмінесценція (у широкому значенні слова) — це світіння деяких речовин, що знаходяться в будь-якому із трьох станів: газоподібному, рідкому чи твердому, що не супроводжується виділенням тепла (холодне світіння). Люмінесценція, що виникає в результаті ультрафіолетового опромінення речовин, називається фотолюмінісценцією (приставки електро- і фото- для стислості не вимовляються). У люмінесцентних лампах люмінесценцію мають спеціальні кристалічні сполуки, що називаються люмінофорами. До них відносяться кислотні солі: силікати, вольфрамати, молібдати, фосфати чи борати, що наносяться на внутрішню поверхню скляного балона чи трубки. Кожен люмінофор при опроміненні світиться властивим йому одним кольором, що відповідає певній довжині хвилі. Для одержання потрібного кольору світіння лампи використовується суміш з декількох люмінофорів. Люмінофори, опромінені ультрафіолетовими променями, виділяють світлову енергію іншої довжини хвилі (фотолюмінісценція). За законами фізики таке перетворення, як правило, відбувається у випадку, коли короткохвильові випромінювання перетворюються в довгохвильові. Тому люмінофори випускають видиме світло в діапазоні від фіолетових до червоних відносно довгохвильових випромінювань під впливом більш короткохвильових невидимих ультрафіолетових променів.

До імпульсних приладів іскрового розряду відносяться імпульсні газорозрядні лампи (лампи-спалаху). Розряд у газі відбувається за рахунок високовольтного імпульсу від зарядженого конденсатора великої ємності. Протягом імпульсного розряду, що триває долі секунди, у лампах протікає струм у десятки – тисячі амперів.

У залежності від тиску пару у середині колби газорозрядні прилади поділяються на прилади: низького (0,01 - 1 мм рт. ст.), високого (0,3 - 3 ат) і надвисокого (від 3 до декількох сотень атмосфер) тиску (1 атм. = 760 Торр, 1 мм рт.ст. = 1 Торр = 133 Па).

2. Люмінесцентні газорозрядні джерела світла характеризуються наступними основними параметрами:

Світлові параметри:

- 1) колір і спектральний склад випромінювання;
- 2) світловий потік;
- 3) яскравість;
- 4) розподіл випромінювання в просторі;
- 5) пульсація світлового потоку.

Електричні параметри:

- 1) потужність;
- 2) робоча напруга;
- 3) рід струму живлення;
- 4) тип розряду і використовувана область світіння.

Експлуатаційні параметри:

- 1) світлова віддача;
- 2) термін служби;
- 3) розміри і форма лампи;
- 4) ціна лампи та ін.

В основу класифікації може бути покладений кожний із приведених параметрів. Найбільш поширена класифікація люмінесцентних ламп масового застосування по наступним параметрах:

- 1) колір і спектральний склад випромінювання;
- 2) потужність лампи;
- 3) робоча напруга на лампі;
- 4) тип розряду;
- 5) схема включення;
- 6) форма лампи й ін.

Параметри деяких розповсюджених типів газорозрядних люмінесцентних джерел світла приведені в таблицях додатків 1 - 4.

3. Для люмінесцентних джерел світла було розроблено різноманітні джерела живлення. Традиційно їх живлять від промислової мережі використовуючи дросельний баласт з стартером для збудження та підтримки розряду [1]. Але зараз в багатьох випадках використовують електронний баласт, який має ряд переваг [4]. В додатку 5 зображена схема типового електронного баласту, що використаний в лабораторній роботі.

Він складається з випрямлювача VD1 – VD4 з фільтруючим конденсатором C1, напруга на якому становить 310 В, генератора прямокутних імпульсів, виконаного на транзисторах VT1 – VT2 та спрощеної схеми розігріву катодів лампи на конденсаторі C5.

В момент ввімкнення на елементи R1 – C2 подається напруга і конденсатор C2 заряджається до напруги відкриття динистору VDB3, через який подається напруга зміщення для відкриття транзистору VT2. При відкритому транзисторі VT2 від’ємний потенціал проступає на середню точку \otimes . Конденсатор C2 розряджається, через VT2, а конденсатор C3 заряджається. C3 являється джерелом живлення каскаду на транзисторі VT1. Починає проходити струм розжарення катодів від “плюса” через конденсатор C42, катод VL4 (OUT 2 - OUT 1), конденсатор C5, катод VL4 (OUT 3 - OUT 4), дросель L4, обмотку L3 кільцевого трансформатору TV1, відкритий VT2 “мінус”. При цьому накопичується енергія в коливному контурі C42 – L4. Коли розряд C2 припиняється, VT2 закривається, що викликано відсутністю подачі напруги зміщення на базу VT2 з обмотки L2 кільцевого трансформатору TV1 в зв’язку з тим, що конденсатор резонансного контуру C42 зарядився, струм зарядки якого проходить через L3 TV1. На базу VT1 подається напруга з L1, що його відкриває. Через відкритий VT1 розряджається конденсатор C3, а також конденсатор резонансного контуру C42. Струм його розрядки проходить через ланцюг: колектор-емітер VT1, обмотка L3 кільцевого трансформатору TV1, дросель L4, лампа VL4. По закінченню розрядки C42 на бази транзисторів VT1, VT2 подаються сигнали з обмоток TV1 – закривання та відкриття, відповідно, і процес повторюється знову. Діоди VD6 – VD7 захищають транзистори від пробую в момент виключення. Напруга між середньою точкою \otimes та “плюсом” таких схеми представляє собою прямокутні імпульси з частотою 20 – 40 кГц в залежності від параметрів часозадаючих елементів. При таких режимах роботи практично відсутні пульсації випромінювання лампи, що зменшує втомлюваність очей.

Опис лабораторної установки

В комплект для виконання лабораторної роботи входять лабораторна установка та осцилограф (C1-67).

Лабораторна установка вміщує різноманітні люмінесцентні лампи з їх джерелами живлення (додатки 6, 7). Відповідна лампа вмикається за допомогою перемикача SA3 “Макети”. При положенні VL1 перемикача “Макети” запалюється енергоекономічна люмінесцентна лампа з електронним баластом, що розміщений в її цоколі, який вкручується в стандартний патрон.

В макетах VL2 – VL4 використані стандартні 18 W люмінесцентні ртутні лампи низького тиску (лампи денного світла) з скляним трубчатим балоном та двома цоколями з його торців. При положенні VL2 перемикача “Макети” вмикається лампа з дросельним баластом; VL3 – з електронним баластом. Під лампами знаходяться фотодіоди, для визначення характеристик світлових потоків. Сигнали з них поступають на гнізда XS6, XS5, відповідно.

При положенні VL4 перемикача вмикається лампа з електронним баластом A4 EB – 18 W, до якого під’єднані три ємнісні дільники напруги 1/10 для осцилографування режимів роботи схеми та напруги горіння розряду на частотах 20 ÷ 50 кГц.

При положеннях VL5 – VL8 перемикача по чергово вмикаються сигнальні люмінесцентні лампи VL5 – VL8. Одночасно з кожною з них вмикаються лампи VL9 – VL12. З ламп VL5 – VL8 за допомогою відградуйованого міліамперметра PA1 Ц56/1, перемикача діапазонів SA2 “U (300 В)/I (30 мА)” та проволочного резистору R4 “Еп” знімаються вольт-амперні характеристики їх тліючих розрядів.

В лівому куту лабораторної установки розміщено кріплення для проводу заземлення.

Установка під'єднується до напруги мережі живлення ~ 220 В за допомогою штепсельної вилки з двохжильним проводом і вмикається вмикачем SA1, про що свідчить запалювання індикаторної лампи HL1 “Живлення”. Далі напруга поступає на розв’язуючі трансформатори VT1, VT2, які забезпечують безпечну роботу лабораторної установки в парі з осцилографом.

Вказівки по виконанню роботи

1. Ознайомитись з електричною схемою лабораторного макету. (Додатки 5 - 7.)
2. Перевірити заземлення на лабораторному макеті.
3. Перевести вмикач “Живлення” в положення “0”.
4. Ввімкнути лабораторний макет в мережу живлення.
5. Встановити вмикач “Живлення” в положення “I”, при цьому повинна загорітись індикаторна лампа.
6. Перемикачем “Макети” поступово включити всі типи досліджуваних ламп та впевнитись в їх працездатності.
7. Зробити ескіз лампи макету “VL1”.
8. Зняти та замалювати осцилограми світових потоків макетів “VL2” з дросельним баластом (гніздо “XS5”) та “VL3” з електронним баластом (гніздо “XS4”). Вирахувати коефіцієнти пульсацій світлових потоків (відношення подвійної амплітуди змінної складової до величини постійної складової помноженої на 100 %).
9. На макеті “VL4” зняти та замалювати осцилограму розряду, збудженого за допомогою електронного джерела живлення (гніздо “XS3”) та осцилограми електронного джерела живлення (гнізда “XS1” і “XS2”) (сигнали на гніздах XS1 - XS3 занижені в 10 разів за допомогою ємнісних дільників).
10. З макетів “VL5” - “VL8” зняти вольт-амперні характеристики тліючих розрядів.
11. Замалювати електродні системи ламп “VL9” - “VL12”.

Контрольні запитання:

1. Чим відрізняються самостійний та несамостійний розряди? [1 (ст. 117)]
2. Зобразити повну ВАХ самостійного розряду та охарактеризувати її ділянки [1 (ст. 128)].
3. Пояснити явище люмінесценції. Люмінофори. [1 (ст. 209)]
4. Вимоги до лампових люмінофорів. [1 (ст. 220)]
5. Чому використовуються генератори з падаючою характеристикою для живлення газорозрядних ламп? [1 (ст. 132)]
6. Вплив температури на люмінофори. [1 (ст. 223)]
7. Основні параметри та класифікація люмінесцентних ламп. [1 (ст. 306)]
8. Кольорові та спектральні характеристики освітлювальних люмінесцентних ламп. [1 (ст. 307)]
9. Основні параметри люмінесцентних ламп. [1 (ст. 315)]
10. Спеціальні люмінесцентні лампи. [1 (ст. 322)]
11. Принципові схеми ввімкнення люмінесцентних ламп з різними стартерами. [1 (ст. 333)]
12. Типи стартерів, конструкції та принцип роботи. [1 (ст. 334)]
13. Параметри, що впливають на підбір дроселя для індуктивного баласту. [1 (ст. 337)]
14. Робота люмінесцентних ламп в схемах безстартерного запалювання. [1 (ст. 341)]
15. Схеми плавного регулювання світлового потоку люмінесцентних ламп. [1 (ст. 348)]
16. Робота люмінесцентних ламп на підвищеній частоті. [1 (ст. 349)]
17. Радіозавади, що викликаються люмінесцентними лампами, та способи боротьби з ними. [1(ст. 353)]
18. Які фактори впливають на повний термін роботи люмінесцентних ламп? [1(ст. 355)]
19. Пояснити явище люмінесценції. [2]

20. Неонові лампи. [2]
21. Люмінесцентні ртутні лампи низького тиску. Лампи денного світла. [2]
22. Схеми підпалювання ртутних ламп низького тиску. [2]
23. Стартери та баластні пристрої. [2]
24. Люмінесцентні лампи для опромінення світлоскладів. [2]
25. Бактерицидні лампи. [2]
26. Еритемні лампи. [2]
27. Конструкція та схема ввімкнення сигнальної люмінесцентної лампи. [3]
28. Зробити порівняльну характеристику баластів до люмінесцентних газорозрядних ламп. [4(ст. 291)]
29. Класична схема баласту люмінесцентних газорозрядних ламп. [4(ст. 292)]
30. Типова блок-схема електронного баласту люмінесцентних газорозрядних ламп. [4(ст. 293)]
31. Принцип роботи електронного баласту. [4(ст. 294)]
32. Якими елементами та чому замінюється стартер для розігріву катодів. [4(ст. 291)]
33. Радіолюмінісцентні випромінювачі з твердим мілкодисперсним активатором. [5]
34. Радіолюмінісцентні випромінювачі з газовим активатором. [5]
35. Для чого в люмінесцентних лампах використовуються термокатоди?

Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.

Вимоги до звіту

Звіт повинен вміщувати:

7. Ціль даної роботи.
8. Порядок виконання роботи.
9. Рисунки базових схем живлення газорозрядних люмінесцентних ламп.
10. Рисунок осцилограми світового потоку з лампи з дросельним баластом.
11. Розрахунок коефіцієнтів пульсацій світлових потоків.
12. Рисунки осцилограм роботи електронного баласту.
13. Рисунок сімейства вольт-амперних характеристик люмінесцентних газорозрядних індикаторних ламп.
14. Висновки по роботі.

Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.

Література

1. Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света. 1991.
2. Газоразрядные приборы излучения.
3. Стерлигова М.Д., Наумова Г.Н. Сигнальные люминесцентные лампы. Электровакуумная техника. Вып. 37. (Москва. Электроламповый завод. Бюро технической документации.), с. 19 – 22.
4. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника для любителей и профессионалов. Солон-Р, Москва, 2001, с. 291 – 311.
5. Твердохлебов Е.Н., Чечевичкин В.Н., Карклит Л.В. Радиолюминесцентные излучатели оптического диапазона. ПТЭ. № 5, 1990, с. 23 – 30.

6. Волоцкой Н.В. Люминесцентные лампы и схемы их включения в сеть. М., Госэнергоиздат, 1962.
7. Волоцкой Н.В. и др. Люминесцентное освещение. М., Госэнергоиздат, 1955.
8. Зак С.М. Монтаж светильников с газоразрядными лампами. М., «Энергия», 1965.
9. Лукачер В.Г. Осветительные устройства с люминесцентными лампами. М., Госэнергоиздат, 1959.
10. Малкин Д.Я. Применение газоразрядных источников света. М., «Энергия», 1964.
11. Маршак И.С. и др. Импульсные источники света, М., «Энергия», 1978.
12. Федоров В.В. Люминесцентные лампы. М., Энергоиздат, 1992.

Дані неонових ламп

Позначення лампи		Тип струму	Початкова напруга виникнення розряду, <i>в</i>	Найбільша допустима напруга виникнення розряду, <i>в</i>	Напруга горіння, <i>в</i>	Найбільший робочий струм розряду, <i>ма</i>	Строк служби, <i>год</i>	Баластний опір	Тип цоколю
старе	нове								
ВМН-1	—	—	160	—	—	2	—	Окремий	СФ-10
ВМН-2	—	—	126	—	—	—	—	»	СФ-10
МН-3*	—	Постійний	48—65	—	—	1	300	»	1Ш12
МН-4	—	»	80	—	—	2	500	»	1Ш12
МН-5	ТН-О.3	»	150	155	65	0,3	200	300 ком**	РЮ***
МН-6	—	»	90	—	—	0,8	100	Змінний	Відсутній
МН-6а	—	»	55	—	—	0,8	—	»	»
МН-7	—	»	87	—	—	2	200	а	2Ш15
МН-8	ТН-0,2	г	85	90	65	0,25	200	»	1Ш9***
МН-11	—	»	85	—	—	4	—	»	111115
МН-12	—	Постійний	95	—	—	0,2	—	Змінний	1Ш15
МП- 15	—	—	220	—	—	0,45	—	»	Р10
ПН-1	ТН-0.9	Постійний	200	205	150	0,9	300	80 ком	1Ш15
ПН-2	—	—	115	—	—	0,9	—	—	Р14
ПН-3	ТН-0.5	Постійний	90	108	55	0,5	300	Змінний	2Ш15
СН-1	ТН-20	Змінний 220 в	150	205	—	20	1000	В лампі	Р27
СН-2	ТН-30	Змінний 27 в	82	115	—	30	1000	В лампе	Р27
ТМН-2	—	—	200	—	—	50	—	Змінний	Ц10
УВН-1	—	Змінний	550	—	—	—	—	Конденсатор	СФ10
ФН-2	ТН-1	»	140	168	49	1	100	Змінний	СФШ9
95СГ9	—	—	95	—	—	3	—	—	1Ш12
	ТН1-1 ,5	Змінний та постійний	120-160	—	90	1,5	1000	—	—

Дані люмінесцентних ламп низького тиску

Тип лампи	Потужність, <i>вт</i>	Напруга, <i>в</i>	Струм, <i>а</i>	Світловий потік, <i>лм</i>	Віддача, <i>лм/вт</i>	Середня величина світлового потоку після 1000 год горіння, <i>лм</i>	Розміри, <i>мм</i>		
							<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>D</i>
ЛДЦ ЛД ЛХБ ЛБ ЛТБ	15	58	0,3	450	30	315	437,4-3	452,4-3,5	25
				525	35	365			
				600	40	420			
				630	42	440			
				000	40	420			
ЛДЦ ЛД ЛХБ ЛБ ЛТБ	20	60	0,35	620	31	465	589,8—3	604,8-3,0	38±2
				760	39	570			
				900	45	675			
				980	49	7315			
				900	45	675			
ЛДЦ ЛД ЛХБ ЛБ ЛТБ	30	108	0,34	1110	37	775	894,6-3	909,6-3,5	25±2
				1380	46	970			
				1500	50	1060			
				1740	58	1230			
				1500	50	1060			
ЛДЦ ЛД ЛХБ ЛБ ЛТБ	40	108	0,41	1520	38	1100	1199,4-3	1214,4-3,5	38±2
				1960	49	1470			
				2200	55	1650			
				2400	62	1860			
				2200	55	1650			
ЛДЦ ЛД ЛХБ ЛБ ЛТБ	80	108	0,82	2720	34	1920	1500-3	1515-3,5	38±2
				3440	43	2400			
				3840	48	2690			
				4320	54	3020			
				3840	48	2690			

Додаток 3

Таблиця 1

Дані люмінесцентних ламп для опромінення світлоскладу

Тип	Основні параметри			Інтенсивність ультразвукового випромінювання, мкВт/см^*
	напруга на лампі, в	потужність, вт	світловий потік, лм	
УФО4А	11,4	4	10	0,17
УФО5	10,4	5	10	0,17

Таблиця 2

Дані двоелектродних люмінесцентних ртутних ламп високого тиску

Тип лампи	Потужність, вт	Напруга на лампі, в	Світловий потік, лм	Основні розміри (найбільші), мм	
				D	L
ДРЛ 250М	250	140	10500	125	320
ДРЛ 500М	500	140	21 000	145	360
ДРЛ 750М	750	140	33000	170	390
ДРЛ 1000М	1000	140	46000	200	440

Таблиця 3

Дані чотирьохелектродних люмінесцентних ртутних ламп високого тиску

Тип лампи	Напруга на лампі, <i>в</i>	Початковий робочий струм, <i>а</i>	Номінальний світловий потік, <i>лм</i>	Основні розміри, <i>мм</i>	
				діаметр <i>D</i>	довжина <i>L</i>
ДРЛ 80	115	0,8	2800	77	157
ДРЛ 125	125	1,15	4800	77	177
ДРЛ 250-2М	140	2	10000	92	220
ДРЛ 400 М	143	3,2	18000	120	285
ДРЛ 700	143	5,6	33000	140	310
ДРЛ 1000-2	143	8	50000	168	360

Додаток 4

Таблиця 1

Дані бактерицидних ламп

Тип	Напруга, <i>в</i>		Потужність лампи, <i>вт</i>	Потужність споживання з мережі, <i>вт</i>	Струм, <i>а</i>	Бактерицидний потік, <i>бант</i>		Світловий потік, <i>лм</i>	Променистий потік, <i>вт</i>
	мережі	на лампі				номінальний	найменший		
БУВ- 15*	127	57	15	19	0,3	1,5	1,2	60	1,85
БУВ-30**	127	110	30	36	0,32	3,2	2,56	130	4,55
ЕУВ-30-П*	220	46	30	38	0,6	2,5	2	100	3,2
БУВ-60-П**	220	88	60	72	0,65	6	4,8	215	7,8

Таблиця 2

Дані еритемних ламп

Тип лампи	Потужність лампи, <i>вт</i>	Напруга, <i>в</i>		Струм, <i>а</i>	Сила еритемного випромінювання, <i>мєр/стер</i>	Опромінювання на відстані 1 м, <i>мєр/м²</i>	Еритемна віддача, <i>мєр/вт</i>	Розміри, <i>мм</i>	
		мережа	на лампі					довжина	діаметр
ЭУВ-15	15	127	58	0,3	33	32	20	452,5	25
ЭУВ-30	30	220	108	0,32	53	50	18	909,5	25

Таблиця 3

Дані люмінесцентних сигнальних ламп

Тип ламп	Рід струму	Напруга мережі, <i>в</i>	Напруга запалювання на постійному струмі найбільше, <i>в</i>	Баластовий опір, Ω	Напруга горіння номінальне, <i>в</i>	Струм номінальний, <i>ма</i>
ТЛО-3-1 ТЛЗ-3-1 ТЛЖ-3-1 ТЛГ-3-1	Змінний Змінний Постійний Змінний Постійний	127 220 380	145	20 47 100	80	3
ТЛО-3-2 ТЛЗ-3-2 ТЛЖ-3-2 ТЛГ-3-2	Змінний Постійний Змінний Постійний	220 380	185	47 100	80	3

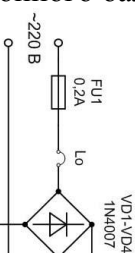
Примітка.

У позначенні типу ламп букви позначають: Т - тліюча;

Л – люмінесцентна; О – жовтогаряча; З – зелена; Ж – жовта; Г – блакитна. Перша цифра вказує номінальний струм лампи, *ма*; друга – характеризує лампу по напрузі запалювання.

Додаток 5

Принципова схема електронного баласту ЕВ – 18W



Додаток 6

Принципова схема лабораторної установки

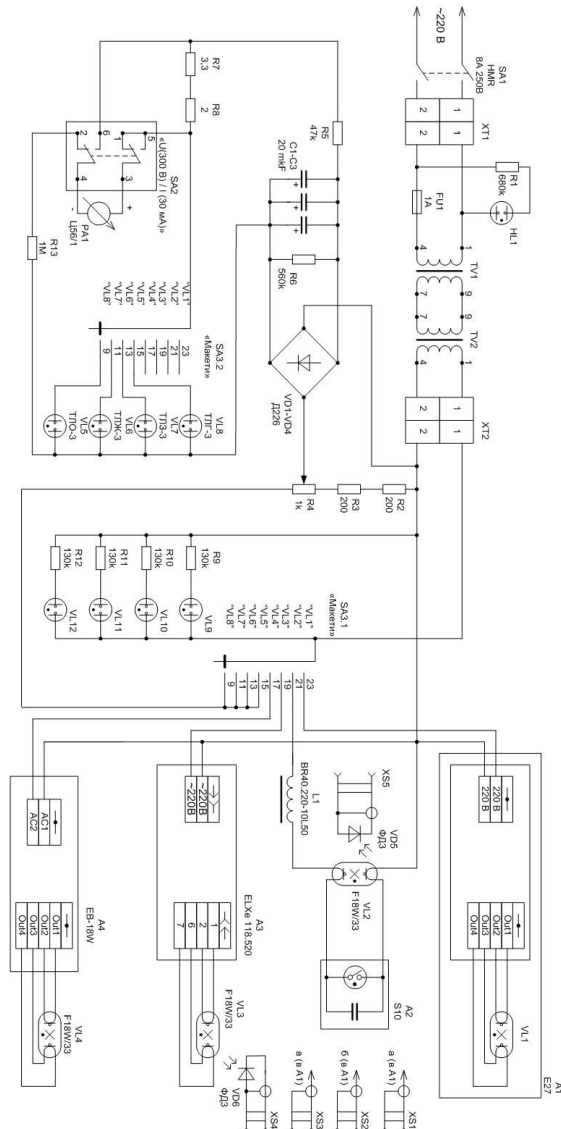
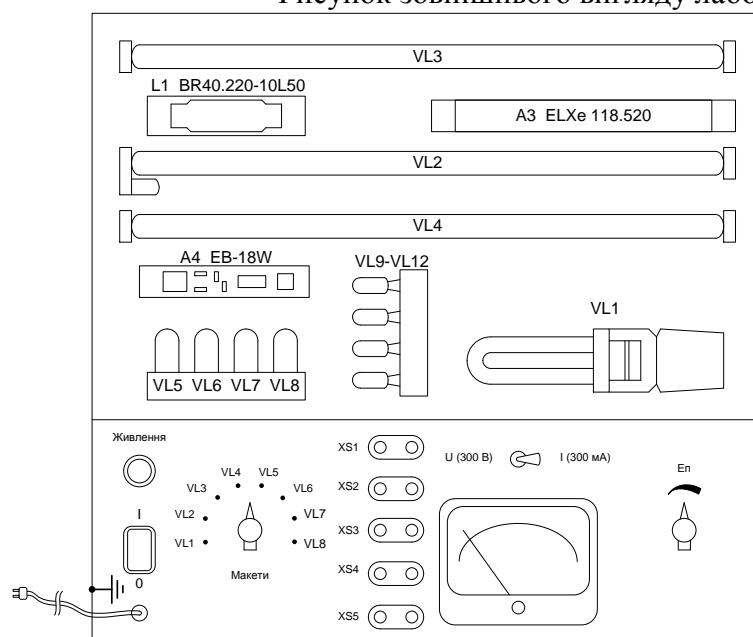


Рисунок зовнішнього вигляду лабораторної установки.



Лабораторна робота № 5

ПЛАЗМОХІМІЧНЕ ТРАВЛЕННЯ

Мета роботи: ознайомитися із принципом роботи установок плазмохімічного травлення, їхніх конструкцій, вивчити технологію плазмохімічного травлення та методи контролю очистки поверхні від органічних забруднень.

Короткі теоретичні відомості

Іонно-плазмове травлення широко використовується з метою попереднього очищення поверхонь підкладок та підшарів перед нанесенням металічних шарів. Тобто в усіх сучасних установках для нанесення металічних шарів передбачені системи очищення підкладок за допомогою іонно-плазмового травлення. Процеси іонно-плазмового травлення є конкурентноздатними і переважними для травлення шарів міді та нікелю у друкованих платах великих розмірів.

Лабораторні установки плазмохімічного травлення призначені для плазмохімічного видалення фоторезисту та перед дифузійного очищення поверхонь пластин від органічних забруднень. Установки відносяться до високочастотних установок промислового призначення, призначені для експлуатації на промислових та інших підприємствах. Принцип роботи установок плазмохімічного травлення заснований на застосуванні низькотемпературної плазми для видалення фоторезисту та перед дифузійного очищення поверхні пластин. Плазма утворюється в камері при розрідженні порядку 133 Па (1 мм. рт. ст.), коли до індуктора установки плазмохімічного травлення з індуктивним збудженням розряду (установка ПХТ з ІЗР) або до обкладок установки плазмохімічного травлення з ємнісним збудженням розряду (установка ПХТ з ЄЗР), розташованим навколо камери, подається високочастотна напруга. До установок подаються такі гази: кисень газоподібний, фреон 14, елегаз, азот газоподібний або повітря, очищене від пилу та масла.

1. Плазмохімічні процеси в мікроелектроніці

1.1 Фізико-хімічні процеси у низькотемпературній газорозрядній плазмі.

Низькотемпературна газорозрядна плазма (НГП) – це слабо іонізований газ, тиск якого складає $13 \cdot 10^{-2} - 13 \cdot 10^2$ Па, зі ступенем іонізації порядку $10^{-6} - 10^{-4}$ (концентрація електронів $10^{15} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$), в якому електрони мають середню енергію 1 – 10 еВ (температуру порядку $10^4 - 10^5$ К), а середня енергія важких часток газу (іонів, атомів, молекул) на два порядки менше (температура $(3 - 5) \cdot 10^2$ К). Такий стан, коли $T_e \gg T_i = T_g$, підтримується при невеликій потужності виділення джоулевої теплоти внаслідок відносно великої теплоємності газу важких часток та швидкого виносу теплоти з розряду.

НГП може генеруватися у розрядах, що збуджуються постійним електричним полем, а також до прилеглих розрядів на низькій частоті ($10^2 - 10^3$ Гц) в ВЧ - ($10^5 - 10^8$ Гц), та НВЧ - ($10^9 - 10^{11}$) та в електромагнітних полях оптичного діапазону частот ($10^{13} - 10^{15}$ Гц) (див. рис. 1.)



Рис. 1. Класифікація плазми за основними параметрами

НГП інертних газів містить атоми, електрони, іони та збуджені атоми, а НГП молекулярних газів, крім того, ще й вільні атоми та радикали, які утворилися в результаті дисоціації молекул. Вільні атоми та радикали мають неспарений електрон на зовнішній валентній орбіті і тому проявляють високу хімічну активність, внаслідок чого їх часто називають *хімічно активними частками (ХАЧ)*. Кількісно стан дисоціації характеризується ступенем дисоціації:

$$a_d = n_{\text{ХАЧ}} / n_{00},$$

де $n_{\text{ХАЧ}}$ – концентрація ХАЧ у плазмі.

Низький ступінь іонізації НГП (концентрації електронів) $a_i = 10^{-6} \div 10^{-4}$ знаходиться в невідповідності з відносно високою електронною температурою (1 – 10 eV). Це пов'язано з тим, що процес рекомбінації при потрібному зіткненні за участі двох електронів не врівноважує швидкість іонізації електронним ударом. Існує інший на декілька порядків більш швидкий процес розпаду електронів (дифузія до стінок з подальшою рекомбінацією на поверхні), що попереджає наростання ступеню іонізації до рівноважного значення. У молекулярних газах процес розпаду може також відбуватись також внаслідок дисоціативної рекомбінації у парних зіткненнях.

Що до ступеня дисоціації (концентрація ХАЧ в НГП), то він в рівноважному стані повинен відповідати низькому значенню T_e , але через наявність високо енергетичних в порівнянні з частками газу електронів у стаціонарному стані концентрація ХАЧ (а також продуктів їх реакцій) у плазмі може суттєво відрізнятись від термодинамічно-рівноважної, або може значно перевищувати останню.

В утворенні іонів та ХАЧ в НГП окрім електронів можуть приймати участь збуджені атоми та молекули, що знаходяться головним чином у метастабільному стані (рис. 2.)

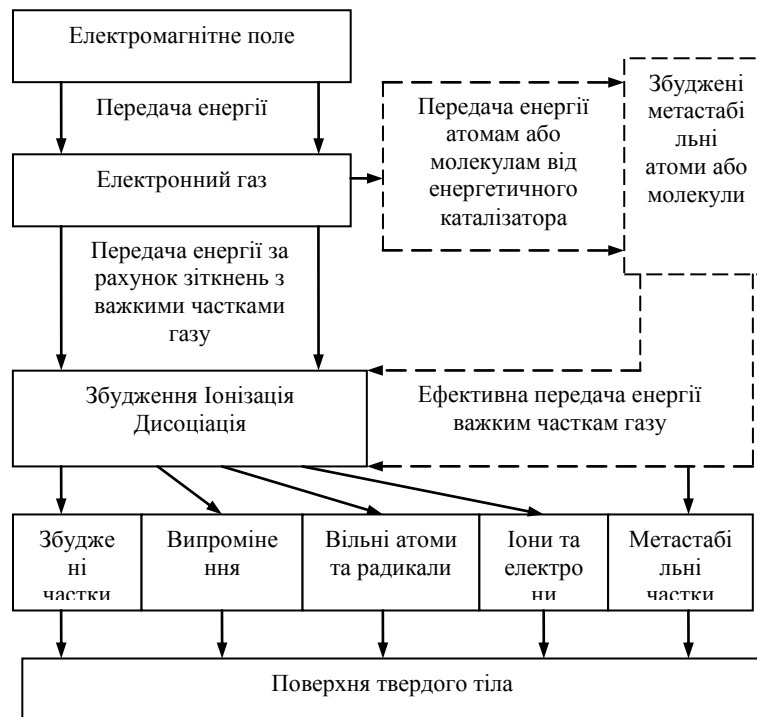


Рис. 2. Схема передачі енергії електромагнітного поля в НГП та фізико-хімічні процеси, які при цьому відбуваються

Збуджені атоми та молекули слугують передавачами енергії від електронного газу плазми до атомів та молекул, що активуються, полегшуючи таким чином процеси іонізації та дисоціації. Збуджені атоми та молекули виконують функцію енергетичного каталізатора, пришвидшуючи передачу енергії від електронного газу до часток газу, та порівняно з іншими каталізаторами дозволяють отримати більш високі стаціонарні концентрації іонів, ХАЧ та продуктів їх реакції. Роль енергетичного каталізатора найчастіше грають збуджені атоми чи молекули домішок в основному газі, але можливі випадки коли ними є і збуджені молекули основного газу.

Рекомбінація заряджених часток та ХАЧ може відбуватися всередині плазми (гомогенна рекомбінація) та на обмежуючих її поверхнях (гетерогенна рекомбінація).

З рис. 2. видно, що у плазмі в загальному випадку молекулярного газу виникають заряджені частки (електрони, позитивні та негативні іони), ХАЧ (вільні атоми та радикали), збуджені частки (атоми та молекули), в тому числі і у метастабільному стані, а також генерується випромінювання у діапазоні від інфрачервоного до ультрафіолетового. Розглядаючи можливості НГП для проведення гетерогенних фізико-хімічних процесів обробки на розмежуванні газ (газова плазма) – тверде тіло, можна виділити три випадки:

- 1) НГП є одночасно середовищем проведення, джерелом часток, що приймають участь у процесі, та стимулятором (активатором) процесу;
- 2) НГП є лише джерелом часток, що приймають участь у процесі;
- 3) НГП використовується тільки для активації часток та поверхонь, що приймають участь у процесі, та для стимуляції самого процесу.

У першому випадку поверхня твердого тіла, що обробляється, знаходиться у контакті з плазмою, в другому – по за плазмою, а в третьому можливі обидва варіанти.



Рис. 3. Процеси, які реалізуються за допомогою НГП.

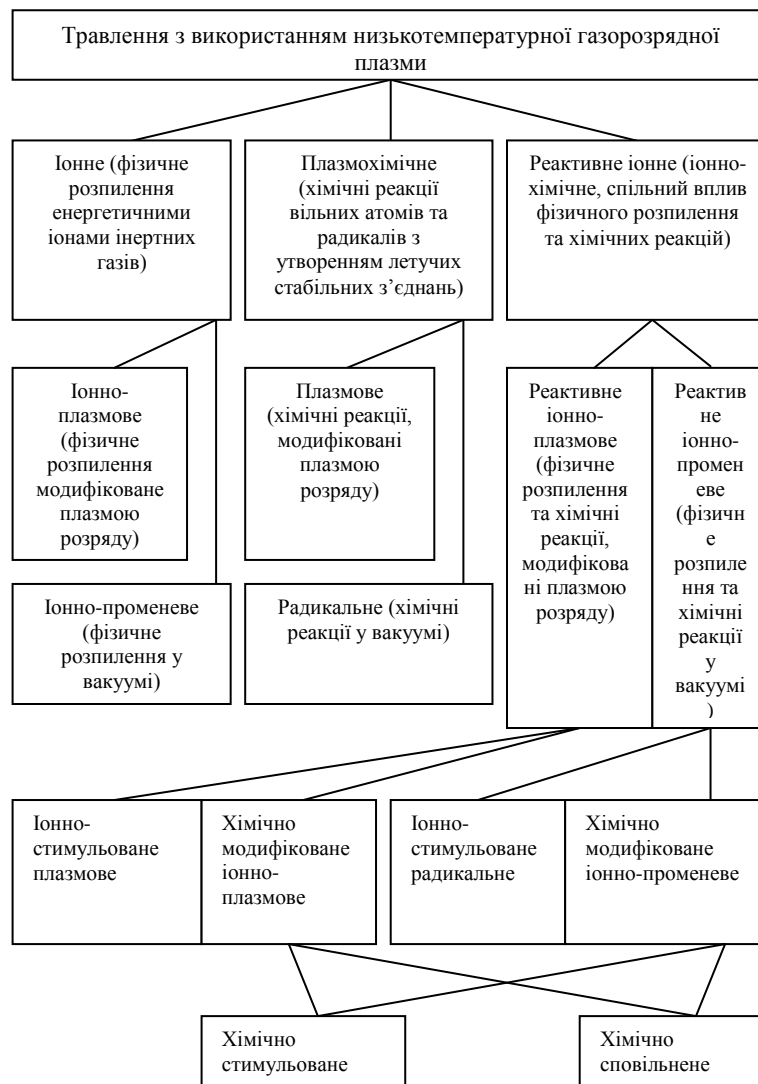


Рис. 4. Класифікація процесів травлення з використанням НГП.

В залежності від виду плазмоутворюючого газу та природи поверхні твердого тіла у кожному з трьох перерахованих випадків за допомогою НГП можуть бути реалізовані різні процеси обробки (рис. 3.).

Ці процеси можна об'єднати у три великі групи:

- видалення матеріалу з поверхні твердого тіла (всі види розпилення, травлення та очищення);
- нанесення матеріалу на поверхню твердого тіла (хімічне з газової фази, хімічне з матеріалу мішені, фізико-хімічне з матеріалу мішені, змінного в газовій фазі);
- модифікація поверхневого шару твердого тіла (окислення, анодування, нітридизація, легування іншими елементами, текстуровання, віджиг).

1.2 Класифікація процесів травлення та очистки матеріалів з використанням низькотемпературної газорозрядної плазми

Процес очищення матеріалів – це видалення з його поверхні сторонніх атомів та молекул.

Травлення – це видалення поверхневих атомів та молекул самого матеріалу.

По фізико-хімічному механізму взаємодії часток НГП з поверхнею матеріалу, що обробляється, процеси травлення можна розділити на три великі групи, що перераховані нижче (рис. 4.).

1. *Іонне травлення (ІТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються лише у випадку фізичного розпилення. Розпилення відбувається енергетичними іонами газів, які не реагують хімічно з матеріалом, що обробляється (зазвичай іонами інертних газів). Якщо

поверхня матеріалу, який піддається обробці, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають *іонно-плазмовим (ІПТ)*. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело іонів, що реалізують травлення, то травлення називають *іонно-променевим (ІПТ)*.

2. *Плазмохімічне травлення (ПХТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються в результаті хімічних реакцій. Хімічні реакції відбуваються між ХАЧ та поверхневими атомами з утворенням летучих продуктів. Якщо поверхня матеріалу, що обробляється, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають *плазмовим (ПТ)*. Під час ПТ хімічні реакції стимулюються низько-енергетичними електронним та іонним бомбардуваннями, а також впливом випромінювання. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело ХАЧ, то таке травлення називають травленням вільними атомами та радикалами або *радикальним травленням (РТ)*. РТ відбувається спонтанно без стимуляції електронним та іонним бомбардуваннями, а в деяких випадках і за відсутності впливу випромінювання.

3. *Реактивне іонне та іонно-хімічне травлення (ІХТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються як у випадку фізичного розпилення енергетичними іонами, так і хімічних реакцій між ХАЧ та поверхневими атомами. Якщо поверхня матеріалу, який піддається обробці, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають реактивним іонно-плазмовим (РІПТ). Під час РІПТ на поверхню зразка діють енергетичні іони, атоми та радикали, електрони та випромінювання. При цьому процес фізичного розпилення матеріалу може як прискорюватись, так і уповільнюватись хімічними реакціями, які в свою чергу можуть бути активовані іонним та електронним бомбардуваннями, а також випромінюванням. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело енергетичних хімічних активних іонів, таке травлення називають реактивним іонно-променевим (РІПТ). Під час РІПТ поверхня зразка піддається впливу молекулярних та атомарних іонів, які окрім розпилення у випадку ударної дисоціації та нейтралізації утворюють ХАЧ, що вступають в хімічні реакції з матеріалом, який обробляється. Хімічні реакції можуть як прискорювати, так і сповільнювати процес фізичного розпилення.

1.3 Вимоги до робочих газів

До робочих газів, які використовуються в процесах ПХТ та ІХТ висуваються наступні вимоги:

- забезпечення при розкладі у плазмі газового розряду максимального виходу енергетично та хімічно активних часток, що здатні утворювати або стабільні летучі з'єднання, або такі що легко розпилюються при взаємодії з матеріалом, який обробляється;
- забезпечення потрібних швидкості, селективності та анізотропії процесу травлення;
- відсутність токсичності та вибухонебезпечності, корозійного впливу та забруднення стінок реактора, пристроїв, що знаходяться всередині камер та відкачних магістралей та деградуючого впливу на масла вакуумних насосів.

Зріджений газ займає перше місце серед потенційно небезпечних хімічних речовин та матеріалів, які використовуються у виробництві інтегральних схем (ІС). Подібно іншим хімічним речовинам гази можна розділити на шість категорій *за основною небезпечністю*:

- корозійні;
- вогне небезпечні;
- інертні (душать за рахунок заміщення кисню);
- окиснюючі;
- пірофорні (здатні самозагорятися при температурі вище 54°C);
- токсичні (отруйні).

Забезпечення безпеки персоналу та захист цінного виробничого обладнання потребують постійної уваги з питань збереження, транспортування, використання та видалення зріджених газів.

Найбільшою загрозою є гази, що самозагоряються та окислюються, оскільки вони можуть викликати вибухи та пожежі з великим людськими втратами.

Корозійні гази спричиняють тяжкі, а іноді і смертельні опіки при потраплянні на шкіру, навіть за дуже малий проміжок часу.

Високотоксичні гази такі, як арсин, мають властивості отруту гемолітичної дії, тобто спричиняють заміщення кисню у крові; інші, наприклад фосфин, впливають на систему дихання. Також важливу увагу треба приділяти впливу другорядних компонентів з точки зору їх концентрації суміші. Наприклад, газ, який складається з 1% H_2 та 99% N_2 , не є вогнебезпечним, але якщо H_2 складає 5%, а N_2 – 95%, то утворюється вогнебезпечна суміш. Крім того, навіть 1% домішок H_2 до N_2 вже має удушуючі властивості.

Окрім газів для ВПТ використовують пари токсичних рідин: $SiHCl_3$, $SiCl_4$, CCl_4 , а також суміші HF , H_2S , NO , NF_3 та інші.

Використання газів, що містять хлор, для травлення алюмінію потребують особливої уваги. Слід уникати застосування CCl_4 через те, що цей газ має канцерогенні властивості, тобто може викликати ракові захворювання. Тому перевагу надають BCl_3 , $SiCl_4$ та Cl_2 . Проте у газах, що містять хлор, якщо вони не достатньо очищені може бути присутня велика кількість токсичних домішок.

Більшість токсичних речовин потрапляє до організму людини через дихальні шляхи та шкіру, тому перед виробництвом постає завдання безпечного збереження та використання цих газів та рідин, попередження можливості їх витікання та забруднення іншими газами.

Вибір робочого газу чи складу газової суміші базується на певних вимогах, таких як:

- швидкість v_{mp} ;
- селективність s ;
- показник анізотропії A .

Селективність травлення одного матеріалу відносно іншого характеризується відношенням швидкостей травлення цих матеріалів в однакових умовах. *Анізотропія* визначається як відношення швидкості травлення до нормалі та дотичної до поверхні матеріалу, який піддається травленню. Швидкість та селективність травлення суттєво залежать від виду або складу газової суміші. Якщо реакція травлення є екзотермічною, то підвищення температури матеріалу чи газу буде сприяти зменшенню швидкості, а зниження температури – збільшенню швидкості протікання реакцій. Якщо реакції травлення мають різні екзотермічності, то для збільшення швидкості ПХТ матеріалу, взаємодія якого з ХАЧ дуже екзотермічна, потрібно збільшити концентрацію ХАЧ та послабити іонне бомбардування чи застосовувати РТ. Відповідно для матеріалів, взаємодія яких з ХАЧ слабо екзотермічна, можна збільшувати селективність травлення, зменшуючи концентрацію ХАЧ та підсилюючи іонне бомбардування. При ІХТ на швидкість та селективність травлення суттєво може впливати енергія іонів. Вплив енергії іонів тим більше, чим більш ефективним є процес осадження вуглецевих та органічних плівок на поверхні матеріалу, який піддається травленню, тобто чим біль в молекулі робочого газу міститься атомів вуглецю порівняно з атомами галогенів.

Склад робочого газу впливає не лише на швидкість та селективність, а іноді й на анізотропію. Так при зменшенні тиску газу довжина вільного пробігу та напрямок впливу заряджених часток зростають, а концентрація ХАЧ зменшується, що збільшує анізотропію, одночасно зменшуючи швидкість травлення, і все навпаки при збільшенні тиску.

В деяких випадках застосовують багатокомпонентні суміші газів, наприклад $C_2F_6 + CHF_3 + O_2 + He$. Перший компонент суміші забезпечує високу швидкість травлення (1,4 мкм/мин), другий гарантує значну селективність (5:1 відносно кремнія та фоторезисту), третій забезпечує анізотропний профіль травлення, четвертий дозволяє ефективно розсіювати потужність, що виділяється на пластині, оскільки гелій має високу теплопровідність.

Склад робочого газу та як наслідок параметри процесу можуть змінюватись за рахунок різних парціальних тисків залишкових газів реакторі від циклу до циклу, фізичного розпилення матеріалу електродів, а також хімічних реакцій ХАЧ з матеріалами стінок реактора та приладів всередині камер.

1.4 Механізм ПТТ

При ІТ видалення поверхневих шарів матеріалу здійснюється за рахунок фізичного розпилення енергетичними іонами інертних газів чи іонів, які хімічно не реагують з матеріалом, що піддається обробці. Основним механізмом взаємодії між іонами, що бомбардують, та атомами матеріалу є процес передачі імпульсу, тобто розпилення здійснюється за рахунок жорстких зіткнень, що призводять до прямого вибиття атомів з рівноважних положень. Можна виділити три різних випадки:

- режим первинного вибиття атомів з рівноважних положень;
- режим лінійних каскадів;
- режим теплових піків.

В режимі первинного вибиття іон, що бомбардує, передає енергію атомам мішені, які можуть вийти через поверхню, або одразу, або після невеликої кількості жорстких зіткнень з приповерхневими атомами, що необхідні для повороту вектора імпульсу. В двох інших режимах атоми, які вибиваються з рівноважних станів, отримують енергію, достатню для вибиття вторинних, третинних і т.д. атомів, частина яких може дістатися до поверхні матеріалу та здолати поверхневий бар'єр.

Фізичне розпилення матеріалів кількісно характеризується *коефіцієнтом розпилення (КР)*, який визначається як середнє число атомів, які видаляються з поверхні матеріалу однією падаючою часткою. Падаючими частками можуть бути атомарні та молекулярні іони, нейтральні атоми, нейтрони, електрони та фотони з великою енергією. В даному випадку, згідно визначенню КР, атом/іон:

$$Y_p = N_a/N_i,$$

де N_a – кількість вибитих (розпилених) атомів матеріалу; N_i – число іонів, які бомбардують матеріал.

Для іонного очищення поверхні матеріалів використовують іони з енергією в діапазоні від 20 до 100 еВ, а для ІТ – від 100 до 1000 еВ. В першому діапазоні розпилення відбувається в режимі первинного прямого вибиття, а в другому – як в режимі первинного вибиття, так і в режимі лінійних каскадів.

ІТ матеріалу починається тоді, коли енергія іонів E_i перевищує деяке значення $E_{\text{пор}}$, яке називається *пороговою енергією*. При $E_i < E_{\text{пор}}$ розпилення матеріалу не відбувається, та при взаємодії та при взаємодії з атомно-чистою поверхнею відбувається відбиття іонів, адсорбція з подальшою десорбцією та нейтралізацією, що здійснюється електронами, які емітують з матеріалу під дією електричного поля іонів. Якщо на поверхні матеріалу присутні адсорбовані сторонні частки та хімічні з'єднання, то внаслідок іонного бомбардування відбувається десорбція та хімічне перетворення.

На десорбуючій дії іонного бомбардування базується процес очищення поверхні матеріалів. Десорбція при іонному бомбардуванні може здійснюватись прямим вибиванням адсорбованого атома падаючим іоном, його вибиттям відображеним від поверхні матеріалу іоном та вибиттям розпиленим атомом матеріалу. При іонному бомбардуванні поверхневі шари монокристалів перетворюються спочатку на полікристалічні, а потім на аморфні. *Доза іонного опромінення D_i , Кл/см²*, визначається:

$$D_i = j_i t,$$

або в іон/см²:

$$D_i = j_i t / Ze,$$

де j_i – щільність іонного струму на поверхні матеріалу, А/см²; t – час опромінення (травлення), с; e – заряд електрона, Кл; Z – кратність заряду іона.

Середня відстань, яку проходить іон, який проник до матеріалу, до зупинки, залежить від енергії та атомного номера іона, а також атомного номера та кристалічної структури матеріалу. В більшості випадків потрібно знати не середній пробіг іонів у матеріалі, а середню глибину їх проникнення. Товщина порушеного шару приблизно рівна подвійній середній глибині проникнення іонів в матеріал та збільшується з підвищенням дози іонного опромінення.

Основна доля енергії іонів (70 – 90%) вивільнюється в матеріалі у вигляді тепла, менше 10% її витрачається на розпилення, а частина що залишилась витрачається на радіаційне руйнування матеріалу, проникнення іонів, вторинну електронну емісію та електромагнітне випромінювання у широкому спектрі частот.

Для вибору технологічних режимів ІТ та очищення матеріалів потрібні такі характеристики часток, які розпилюються:

- кутове розподілення по енергіям;
- середня швидкість;
- середня енергія.

Енергетична ефективність процесу іонного розпилення $\eta_{ен}$ визначається масою матеріалу m , який розпилюється в одиницю часу з одиниці поверхні, що віднесена до щільності потужності $\omega = j_i U_i$ (j_i – щільність іонного струму та U_i – прискорююча іонна напруга), яка витрачається на реалізацію процесу розпилення:

$$\eta_{ен} = Y_p(E_i) A_m / E_i N_a,$$

де A_m – атомна маса матеріалу, який розпилюється; N_a – число Авогадро.

Коефіцієнт розпилення залежить не лише від енергії іонів, а й від наступних характеристик:

- маса бомбардуючих іонів m_i ;
- атомний номер матеріалу, який розпилюється Z_a ;
- кут падіння іонів на поверхню матеріалу α ;
- чистота обробки поверхні;
- температура матеріалу, який розпилюється $T_{рм}$.

1.5. Плазмохімічне травлення неорганічних матеріалів.

Механізми травлення деяких неорганічних матеріалів, що широко використовуються у виробництві електронних приладів, приведені в табл.1

Табл. 1

№	Матеріал	Механізм травлення
1.	Кремній	<p>Основні частинки, активні в травленні кремнію - атоми фтору і радикали SF_5 (внесок останніх у швидкість травлення складає близько 30%). Швидкість травлення за всіх умов і складах плазми прямо пропорційна концентрації атомів фтору при інших рівних умовах і збільшується зі зростанням потоку іонів і різниці потенціалів поверхні і плазми при однакових концентраціях атомів. Основний продукт травлення в газовій фазі SiF_4 (насичений фторид), що випаровується з поверхні, і SiF_2, що має підвищені енергії та десорбується внаслідок іонного бомбардування. Пасивація поверхні за рахунок перерахованих вище часток, а також атомів хлору в хлорвміщуючій плазмі, забезпечує анізотропію травлення внаслідок іонного бомбардування, збільшується в міру збільшення енергії іонів (низький тиск, низька частота поля, накладення додаткового зміщення потенціалів від незалежного джерела або самозміщення).</p> <p>У хлорвміщуючій плазмі, як і при іонно-стимульованому травленні, травлення відбувається тільки за рахунок іонного бомбардування і спостерігається висока анізотропія при низьких швидкостях травлення. При використанні фтор-хлорвміщуючої плазми анізотропія за рахунок пасивації хлором зберігається, а швидкість травлення збільшується за рахунок бомбардування</p>

		атомарним фтором.
2.	Вольфрам	Закономірності травлення вольфраму аналогічні описаним вище для кремнію, що зумовлено високою летючістю насиченого фториду (WF_6) при кімнатних температурах.
3.	Молібден	Механізми травлення молібдену також, в основному, аналогічні механізмам травлення кремнію. Відмінності пов'язані з більш високою температурою кипіння насиченого фториду, що призводить до більш низьких ймовірностей при кімнатній температурі.
4.	Тантал	Насичений фторид танталу плавиться і кипить при температурах значно вище кімнатної. На поверхні утворюється досить товста плівка фториду, а швидкість травлення сильно залежить від температури і іонного потоку
5.	Титан	Плазмохімічне травлення титану спостерігається в хлорвміщуючій плазмі внаслідок більш високої летючості тетрахлориду титану (низька температура травлення). Активними частками в травленні є не тільки атоми, але і молекули хлору, і можливо, інтергалогена FCl . При високих температурах ($> 450\text{ K}$) іонне бомбардування не прискорює травлення, при низьких ($T < 325\text{ K}$) спостерігається явне стимулювання травлення іонами, а електрони прискорюють ріст фторидної плівки. При високих температурах це проявляється в підвищенні швидкості травлення.
6.	Сплав WTi (5:1)	Механізм травлення цього сплаву цікавий тим, що один з його компонентів має нелеткі фториди або хлориди при низьких температурах. В фторвміщуючій плазмі активними частинками в травленні є радикали SF_5 і атоми фтору. Внаслідок різної швидкості травлення фтором компонентів сплаву на Арреніусовських залежностях швидкості травлення від температури спостерігається злам при температурах близько 350 K . Ця температура нижче температури плавлення фториду титану, але вище відповідної температури плавлення фториду вольфраму. Але фторид переважаючого компонента - вольфраму залучає до травлення і титан, оскільки вище цієї температури сплав травиться як єдиний матеріал і збагачення титаном на поверхні після травлення не відбувається. У той же час при $T < 350\text{ K}$ на поверхні спостерігається збагачення титаном і збільшується енергія активації і відповідно знижується швидкість травлення.
7.	Алюміній	Не має летючих галогенідів при кімнатній температурі, за винятком димеру Al_2Cl_6 , температура сублімації якого становить 297 K . Тому травлення плівок алюмінію здійснюють у плазмі хлорвмісних газів та їх сумішей: Cl_2 , CCl_4 , BCl_3 , Cl_2/CCl_4 ; Cl_2/BCl_3 . Активними частинками, що взаємодіють з чистою поверхнею алюмінію, є атоми і молекули хлору. Ймовірності їх реакцій при кімнатній температурі однакові і іонна бомбардування їх не прискорює. Швидкість травлення не залежить від різниці потенціалів між плазмою і поверхнею, потужності розряду. Основний продукт - Al_2Cl_6 . Травлення ізотропно. Анізотропія травлення досягається за рахунок добавок газів (CCl_4 , BCl_3), що

		<p>генерують в плазмі хлорвуглецеві і бор-хлорні радикали (CCl_x, $x = 1-3$; BCl_x, $x = 1-2$). Вони осідають на поверхні, пасивують її, і видаляються, так само як і окислені шари, за рахунок іонного бомбардування.</p> <p>Присутність парів води внаслідок гігроскопічності хлоридів алюмінію адсорбуються, вступаючи з ними в реакцію з утворенням гідроксиду алюмінію. Це призводить до невідтворюваних результатів і зміни властивостей виробів аж до повного стравлення ділянок плівки, що залишилися в ВІС і НВІС під час зберігання на атмосфері навіть під захисним покриттям. Тому необхідний строгий контроль за домішкою парів води.</p>
8.	Мідь	<p>Мідні плівки травлять в хлорвміщуючій плазмі, оскільки хлориди більш летучі, ніж фториди. Частинками, що активно взаємодіють з поверхнею Cu (100) є атоми і молекули хлору, причому ймовірність взаємодії обох частинок практично однакова навіть при кімнатних температурах. Іонна бомбардування не впливає на швидкість процесу.</p> <p>Можливі два варіанти організації процесу:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Експозиція поверхні при кімнатній температурі з наступним нагріванням до температури вище початку сублімації тримера до повного видалення хлорованого шару; – Експозиція поверхні при температурі, вищій за температуру сублімації. У цьому випадку швидкість травлення може змінюватися в широких межах за рахунок варіацій температури. В обох варіантах травлення ізотропно.
9.	Індій, галій	<p>Інші метали III групи періодичної системи - індій, галій та їх сполуки з елементами V групи - фосфором, миш'яком також травлять в хлорвміщуючій плазмі. Набір плазмоутворюючих газів в цьому випадку істотно більше Cl_2, CCl_4, BCl_3, $\text{Cl}_2 / \text{BCl}_3$, Br_2, SOCl_2, CCl_2F_2, PCl_3, HCl, $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$, CCl_4/O_2. Анізотропія травлення досягається за рахунок використання фтору і кисню, оскільки фториди і оксиди цих елементів нелеткі і видаляються іонним розпиленням.</p>
10.	Хром	<p>Плазмохімічне травлення плівок хрому здійснюється в плазмі сумішей хлорвмісних газів з киснем.</p>
11.	Оксиди металів	<p>Плазмохімічне травлення оксидів металів здійснюється тільки в тих випадках, коли утворюються летючі оксифториди або оксихлориди.</p> <p>Травлення інших окислів у плазмі відбувається за рахунок іонного розпилення (ІТ або РІТ), тому здійснюється при низьких тисках ($P < 10\text{Па}$) і великих потенціалах поверхні відносно плазми.</p>
12.	Оксиди кремнію	<p>Травлення двоокису кремнію (SiO_2) здійснюється у фторвміщуючій плазмі атомами фтору і фторвмісними радикалами (CF_x, SF_5 та ін.).</p> <p>Моноксид кремнію і кристалічний кварц можна травити, в основному, шляхом переважно іонного бомбардування - при великих потоках і енергіях падаючих іонів у режимі РІТ.</p>

13.	Нітрид кремнію	Травляться у фторвміщуючій плазмі атомами, фторвмісними радикалами з виділенням SiF_4 і N_2 в газову фазу. Позитивний вплив на швидкість травлення нітриду надають добавки в плазмоутворюючий газ (CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8) водню та вуглеводнів (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4), що призводять до прискореного утворення легколетючого продукту NH_3 .
-----	-----------------------	--

1.6. Плазмохімічне травлення органічних матеріалів.

Полімерні плівки широко використовуються у виробництві виробів у мікроелектроніці в якості фоторезистів і резистивних шарів для електронної і рентгенівської літографії, для захисних покриттів готових мікросхем, а також в якості допоміжних шарів - планаризації рельєфної поверхні перед нанесенням металевих шарів та ін.. Тому сухе або плазмохімічне травлення полімерних плівок представляє дуже важливий елемент технології.

Як правило, органічні матеріали травляться в кисневмісній плазмі. Основними активними частинками є атоми кисню, а продуктами деструкції, що десорбуються, є оксиди вуглецю - CO , CO_2 , водень - H_2 , H_2O і радикали OH (при кімнатній температурі), які, взаємодіючи з воднем в об'ємі плазми або поблизу поверхні, перетворюються на пари води. Для широкого кола полімерних фоторезистів швидкість травлення у кисневій плазмі при однакових умовах змінюється в невеликих межах - кілька десятків відсотків. Фторвміщуючі та повністю фторовані полімери травляться зі швидкостями на порядок меншими, ніж вуглеводневі, і використовуються для підвищення стійкості масок. Попередня термообробка або іонне бомбардування полімерних резистів може призводити до зшивок полімерних ланцюгів, що збільшує стійкість полімерів в кисневмісній плазмі. Цей ефект використовується для створення негативних фоторезистів. У деяких випадках попереднє опромінення полімерів може призводити до структурних змін (обривів ланцюгів, бічних груп, утворення зшивок і т.п.), що збільшує швидкість травлення, і використовується для створення позитивних резистів.

Швидкості травлення майже всіх досліджених полімерів збільшуються при добавках у кисневмісну плазму фторвуглецевих газів в першу чергу за рахунок підвищення швидкості генерації атомів кисню. З іншого боку, генерація атомарного фтору і фторування вуглецевих атомів, особливо бічних груп, призводять до додаткового їх відриву. Вільні зв'язки, що залишаються на поверхні швидше взаємодіють з атомарним киснем.

1.7. Плазмохімічна полімеризація та її роль в плазмохімічному травленні матеріалів.

Як було показано вище, плазмохімічна полімеризація на поверхні експонованих зразків грає важливу роль у створенні високоселективних і високо анізотропних процесів травлення.

У всіх випадках травлення матеріалів в плазмі фтор- і хлорвуглецевих газів та їх сумішей з вуглеводнями закономірності і механізми полімеризації можна використовувати для оптимізації процесів травлення, зокрема, в досягненні анізотропії травлення.

Перш за все, склад плазми повинен вибиратися з тих міркувань, щоб швидкості осадження полімерних плівок на матеріалах, що травляться перевищували швидкості їх травлення в умовах плазми при відсутності іонного бомбардування, але були менше швидкості іонно-стимульованого травлення полімеру, що осаджується. У цьому випадку на бокових поверхнях рельєфу, не схильних до іонного бомбардування, буде осідати полімерна плівка, пасивуючих поверхню і блокуючи травлення матеріалу підкладки. На поверхнях, що бомбардуються іонами (дно рельєфу), що падають по лініях електричного поля - перпендикулярно поверхні зразків, плівка осідати не буде і швидкість травлення буде відповідно вище. Таким чином, буде здійснюватися спрямоване травлення поверхні в напрямку, перпендикулярному їй при відсутності бокового підтраву матеріалу під маску, тобто високоанізотропного травлення.

Після досягнення необхідної геометрії рельєфу у випадках анізотропного плазмохімічного травлення в плазмі, що полімеризується, необхідно вводити операцію ізотропного травлення полімерної плівки з метою видалення її з бічних поверхонь і точного відтворення розмірів і поверхневих властивостей матеріалів.

Необхідно зазначити, що спільною особливістю протікання процесів травлення неорганічних сполук у плазмі є утворення на поверхні матеріалів, що травляться шарів нелетких продуктів (пасивація) в результаті взаємодії з вуглецевміщуючими радикалами (полімеризація) і з киснем, а також у результаті переосадження на поверхні матеріалів, що травляться, продуктів розпилення матеріалів стінок та електродів іонним бомбардуванням. Ці нелеткі продукти видаляються тільки за рахунок подальшого іонного бомбардування пасивованої поверхні, що і складає основу для розробки анізотропних (спрямованих) процесів травлення для створення елементів рельєфу з прямовисними стінками. Використовується той факт, що потоки іонів падають на поверхню по силових лініях електромагнітних полів і при бомбардуванні видаляють пасивуючі шари з горизонтальних ділянок поверхні, залишаючи їх там, куди іони, що бомбардують, не потрапляють. Крім того, виявлено, що різні матеріали травляться неоднаково різними частками, що складає основу для зміни селективності травлення різних верств матеріалів по відношенню один до одного з метою спрямованого формування необхідних структур на поверхні. Іонне бомбардування робить різносторонній вплив на поверхню, прискорюючи дифузію галогенів і кисню вглиб матеріалу, розриваючи зв'язки і прискорюючи реакції в тілі, розпорошуючи нелеткі продукти. Результат істотно залежить від конкретної системи.

Тому в більшості випадків травлення неорганічних матеріалів у плазмі, особливо у випадках анізотропного і селективного травлення, потрібні додаткові операції очищення поверхні, видалення дефектів структури, що вносяться в матеріали в результаті бомбардування різними частками плазми (в тому числі вбудований заряд, утворення порушених шарів, внесення домішок і т.д.). Ці операції здійснюються різними способами, наприклад, шляхом відпалу матеріалів нагріванням аж до високих температур (до 1000°C) у вакуумі та в атмосферах різних газів.

Відзначимо, що плазмохімічні методи травлення різних матеріалів в поєднанні зі стимульованими плазмою процесами осадження різних шарів дозволили створити повністю замкнуті сухі методи створення складних виробів мікроелектроніки - НВІС і надшвидкодійні схеми.

Цей комплекс методів вже використовується і в інших областях техніки - при створенні мініатюрних сенсорів - чутливих приладів виявлення домішок у газах і інших середовищах, датчиків, мікродвигунів, в електроніці, електротехніці, мікроінженерії. Області застосування їх безперервно розширюються і цей процес найближчим часом буде протікати з прискоренням.

2. Класифікація установок іонно-плазмового травлення

За способом збудження та підтримки електричного розряду системи ПТ розділяються на системи:

- з самостійними розрядами постійного струму (ПТ - системи);
- з самостійними ВЧ-розрядами (ВЧ-системи);
- ПТ- та ВЧ- системи зі штучною підтримкою розряду (який підтримується за допомогою допоміжних засобів: термоелектронної емісії, ВЧ- та магнітних полів).

В магнетронних ПТ та ВЧ-системах магнітне поле використовується для збільшення щільності плазми. Системи ПТ можна розділити за кількістю електродів на:

- двоелектродні (діодні);
- трьохелектродні (тріодні);
- багатоелектродні (чотири та більше електродів).

За формою та розташуванням електродів системи ПТТ можуть бути:

- горизонтальні з плоскими електродами (планарні);
- вертикальні з електродами у вигляді циліндрів та багатограних призм.

Найбільш поширеними варіантами конструкцій ПТТ є наведенні на рис. 5..

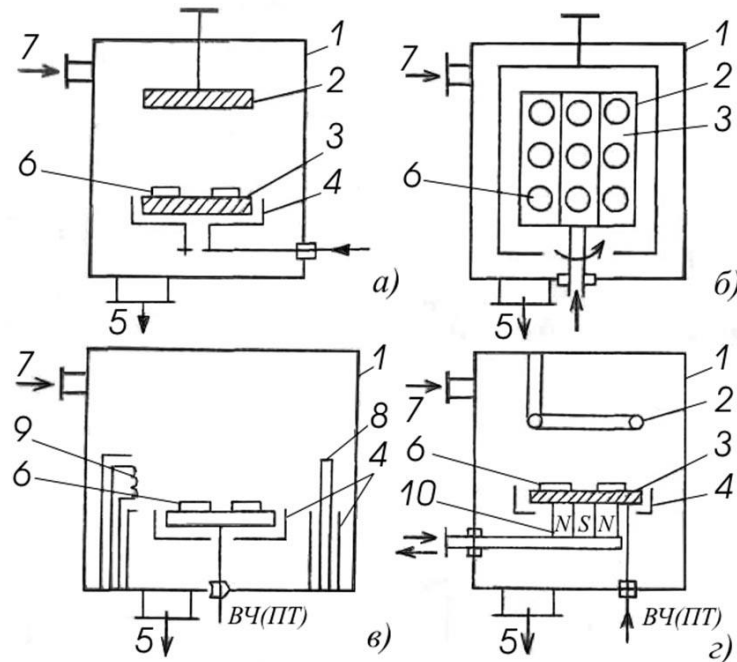


Рис. 5. Системи ПТТ

- а* – планарна ВЧ(ПТ)-діодна; *б* – вертикальна ВЧ(ПТ)-діодна з багатограним електродом; *в* – тріодна; *г* – планарная магнетронна;
- 1 – камера; 2 – заземлений електрод; 3 – ВЧ(ПТ)-електрод; 4 – заземлений екран; 5 – відкачка; 6 – пластини, які піддаються обробці; 7 – напуск газу; 8 – анод; 9 – термокатод; 10 – магнітна система

2.1 Планарна ВЧ(ПТ)-діодна система

Планарна діодна ВЧ-система (рис. 5., *а*) містить два дискових електроди: заземлений (анод) і ВЧ-електрод (або мішень), на який подається напруга від ВЧ-генератора. У діодній ВЧ-системі можливість ПТТ будь-яких матеріалів (металів, напівпровідників, діелектриків, органічних сполук та ін.) поєднується з простотою конструкції і великою площею ВЧ-електрода, на якій забезпечується рівномірне іонне бомбардування. Основні параметри діодної ВЧ-системи та їх типові значення:

- тиск робочого газу p , $p = 0,66 \square - 6,6$ Па;
- міжелектродна відстань $d_{м.е.}$, $d_{м.е.} = 4 \square - 8$ см;
- радіус ВЧ-електрода (мішені) $R_м$, $R_м = 10 \square - 30$ см;
- потужність $W_{вч}$ ВЧ-розряду, $W_{вч} = 1 \square - 4$ кВт;
- частота f ВЧ-розряду, $f = 440$ кГц; 1,76; 5,28; 13,56 та 27,12 МГц.

Характерною рисою систем із ВЧ-розрядами є необхідність узгодження ВЧ-генератора з камерою розпилення, повний опір (імпеданс) якої може змінюватись в широких межах залежно від розмірів електродів, тиску та складу робочого газу, магнітного поля, а також у результаті покриття конструкцій, які знаходяться в середині камер, плівками розпилених матеріалів. Тому в системах ПТТ з ВЧ-розрядами мають бути передбачені пристрій стабілізації робочого тиску при різних витратах робочого газу та пристрій узгодження, що забезпечує певне значення опору між ВЧ-генератором і камерою розпилення, яка виконує роль навантаження.

Параметром, істотно обмежуючим як частоту напруги, що збуджує розряд, так і потужність, яка розсіюється на ВЧ- електроді, є ширина зазору між ВЧ- електродом і заземленим екраном. З одного боку, цей зазор повинен бути принаймні в 2 рази вужче товщини іонної оболонки (темного простору), для того щоб у зазорі не виник розряд. З іншого боку, при надмірному зменшенні зазору збільшуються ємнісні втрати і виникає загроза виникнення пробою (особливо за наявності в мішені гострих країв і забруднень). Коли тиск робочого газу 0,66-6,6 Па, ширина зазору між екраном і ВЧ- електродом становить кілька міліметрів. Ширину зазору можна збільшити, а ємнісні втрати зменшити, якщо використати герметичну конструкцію ВЧ-електрода з автономною відкачкою його внутрішньої порожнини до тиску 10^{-3} Па.

Схема планарної діодної ПТ- системи аналогічна схемі планарної ВЧ- системи (див. рис. 5., а), тільки замість ВЧ- генератора використовується джерело постійної напруги і немає необхідності в пристрої узгодження. Область застосування діодних ПТ- систем обмежена ППТ провідних матеріалів, робочий тиск лежить у діапазоні 1,33-13,3 Па, а розміри електродів і міжелектродні відстані такі, як у діодних ВЧ- системах. Травлення матеріалів у діодних ПТ- системах здійснюється в аномальному тліючому розряді при напрузі на катоді 1-2 кВ. Швидкості ППТ органічних масок у кілька разів нижче, ніж у ВЧ- системах, що дозволяє проводити травлення провідних шарів на більшу глибину.

2.2. Вертикальна ВЧ(ПТ)- діодна система з багатогранним електродом

Для збільшення продуктивності за рахунок завантаження великої кількості пластин (підкладок) на ВЧ-електрод, а також зменшення ступеня забруднення поверхні пластин плівками, які відшаровуються від заземленого електрода, і частками застосовують вертикальну діодну ВЧ- систему з багатогранним ВЧ- електродом (рис. 5., б). В такій системі з метою збільшення рівномірності травлення може бути використане обертання ВЧ-електрода.

2.3 Тріодна система

Тріодна система ППТ складається з трьох незалежно керованих електродів: термокатода, анода та мішені, на якій розміщуються пластини, що оброблюються (рис. 5., е). Після відкачки робочої камери до тиску 10^{-4} Па катод розігрівається до температури, достатньої для досягнення високої щільності струму термоелектронної емісії. Потім у камеру напускається інертний газ до тиску $(6,6 \div 66)10^{-2}$ Па та між термокатодом і анодом подається напруга близько 50 В, що приводить до запалювання дугового розряду. На мішень може подаватися як постійна негативна напруга при травленні провідних матеріалів, так і ВЧ- напруга при травленні діелектриків. У тріодній системі процеси утворення плазми та травлення розділені, що дозволяє керувати енергією іонів за допомогою напруги на мішені. Крім того, якщо в діодній системі щільність іонного струму j_i становить 1-2 мА/см², то в тріодній системі вона може досягати 10-15 мА/см², забезпечуючи високі швидкості травлення матеріалів. До недоліків тріодної системи можна віднести труднощі одержання однорідної плазми через малий розмір термокатода в порівнянні з холодним катодом діодної системи, що призводить до нерівномірності травлення зразків по поверхні мішені. Наявність термокатода також обмежує ресурс роботи тріодної системи до його зміни.

2.4 Планарна магнетронна система

У планарній магнетронній системі ППТ (рис. 5., з) під плоским ВЧ- електродом (мішенню) розміщені постійні магніти, форма полюсів яких визначає геометрію замкнутої зони в поверхні мішені у вигляді витягнутої букви "О". Наявність у мішені замкнутого магнітного поля дає можливість локалізувати плазму в безпосередній близькості до мішені і підвищити щільність іонного струму на мішень. Для забезпечення рівномірності ППТ в системі передбачене сканування магнітного поля по діаметру мішені за допомогою переміщення магнітної системи. Наявність магнітного поля з індукцією 0,10-0,12 Тл дозволяє проводити ППТ при тиску 1-10 Па, забезпечуючи енергію іонів 250 еВ при щільності іонного струму $j_i = 6$ мА/см². Таким чином, у

планарній магнетронній системі при високих швидкостях травлення матеріалів різко зменшується можливість їхнього радіаційного ушкодження внаслідок низьких енергій іонів.

2.5. Типи реакторів

Травлення може здійснюватися в реакторах двох типів (рис. 6., *а* - *г* і рис. 6., *д* - *е* відповідно). До першого типу відносяться циліндричні реактори з перфорованим циліндром-вкладишем (реактори тунельного типу). В таких реакторах зона плазми оточує зону реакцій і доставка ХАЧ до підкладок відбувається за рахунок дифузії. Другий тип - реактори, у яких плазмова зона не охоплює реакційну. В цих реакторах можна використати потік газу із зони плазми в реакційну область до підкладок, що оброблюються, і потім проводити відкачку відпрацьованого газу вакуумною системою. В таких реакторах обидві зони звичайно конструктивно виділені в окремі камери. Відмінність між реакторами всередині кожного типу полягає у розташуванні елементів, способах завантаження підкладок, введення та відкачки газу, збудження плазми.

У циліндричних реакторах з перфорованим циліндром використовується збудження плазми за допомогою індуктора (рис. 6., *а*) і конденсаторних пластин (рис. 6., *б* - *г*). В обох випадках розряд є безелектродним. При цьому застосовується ВЧ- (рис. 6., *а*, *б*) або НВЧ- (рис. 6., *г*) напруга. Відмінність між тунельними реакторами складається також в тому, що перфорований циліндр може бути заземлений (рис. 6., *г*), слугувати ВЧ-електродом (рис. 6., *б*, *в*) або знаходитись під плаваючим потенціалом (рис. 6., *а*). Перфорований циліндр частіше виготовляється з вуглецевої сталі, нікелю або алюмінію, має прозорість не менш 25 % і діаметр отворів більше 3 мм (він повинен бути більше довжини вільного пробігу часток, щоб не перешкоджати їхньому проникненню всередину циліндра). Найбільш широко застосовуються циліндричні реактори з горизонтальним розташуванням осі, що є зручним для касетного завантаження підкладок. Існують також установки з вертикальним розташуванням осі реактора (рис. 6., *в*), що забезпечує зручність обертання підкладкотримача. Циліндричні реактори з перфорованим циліндром широко використовуються в промисловості, у той час як реактори з поділом реакційної та розрядної камер (або зон) і касетним завантаженням (рис. 6., *д*, *ж*), що з'явилися наприкінці 60-х років, не одержали широкого поширення. Досвід їхнього використання показав, що основний недолік таких реакторів - велика нерівномірність травлення по підкладці та в партії внаслідок неоднорідності розподілу активних часток по діаметру і довжині реакційної камери. Особливо велика нерівномірність (50-100%) спостерігається в реакторі, зображеному на рис. 6., *д*, причиною чому є *L*-видна конфігурація реактора. Використання декількох розрядних камер (рис. 6., *е*) зменшує нерівномірність до 15-30%, але вимагає застосування потужного ВЧ-генератора і ускладнює систему узгодження.

Значне поліпшення рівномірності (нерівномірність до 0,5-1%) досягається при індивідуальній обробці підкладок з розташуванням їх перпендикулярно потоку газу, що протікає через реактор. При індивідуальній обробці розрядну камеру можна виконати у вигляді окремого пристрою, що пристиковується до реакційної камери. Підкладки можна послідовно вводити в потік газу з ХАЧ, який витікає з розрядної камери, а потім переміщувати на іншу позицію, де буде проводитись наступна операція травлення або нанесення шарів матеріалу за допомогою іншої розрядної камери. Таким чином, індивідуальна обробка підкладок дозволяє сполучити кілька операцій в одному вакуумному циклі і створити установки безперервної дії, що надзвичайно важко при касетному завантаженні підкладок. З'являється також можливість індивідуального контролю кожної підкладки і полегшується автоматизація процесу. Варіанти конструкцій реакторів для індивідуальної обробки підкладок, які дозволяють проводити операцію, наведені на рис. 6., *ж* - *п*.

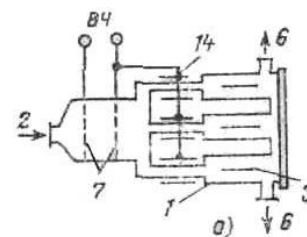
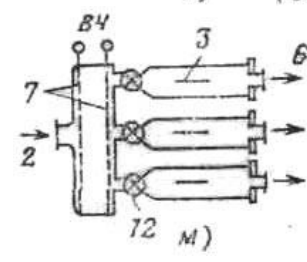
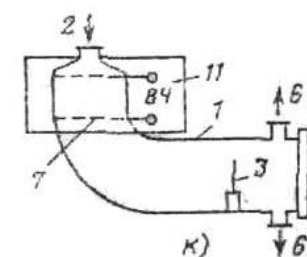
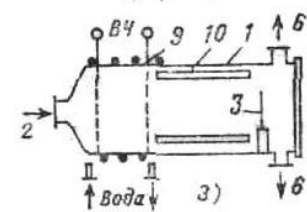
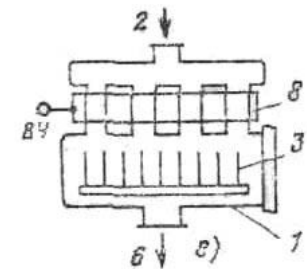
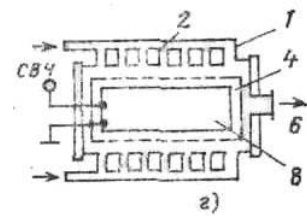
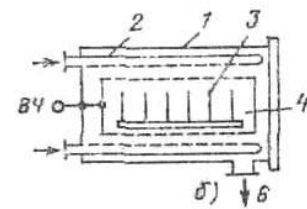
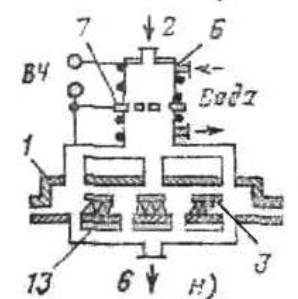
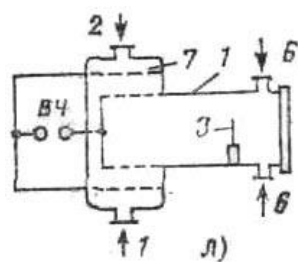
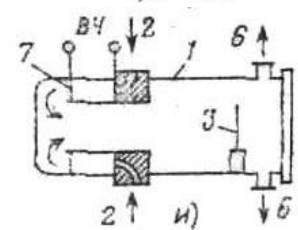
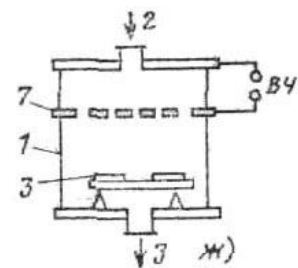
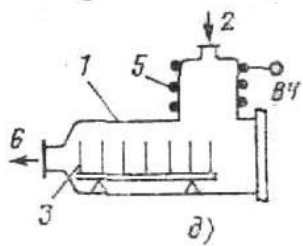
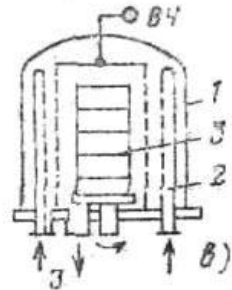
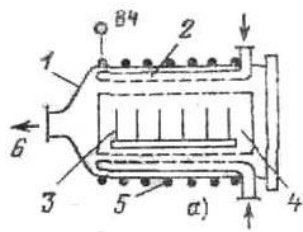




Рис. 6. Схеми конструкцій реакторів для РТ

1 — вакуумна камера; 2 — колектор (отвір) для подачі газу; 3 — підложки, що оброблюються; 4 — перфорований циліндр; 5 — індуктор; 6 — відкачні отвори; 7 — перфоровані електроди; 8 — конденсаторні обкладки; 9 — змійовик водяного охолодження; 10 — вкладиш; 11 — екран; 12 — регульований затвор; 13 — нагрівач; 14 — додаткові електроди; 15 — магніт.

На наведених схемах з метою спрощення зображення розрядна і реакційна камери об'єднані. Потік газу з розрядної камери може доставлятися також до декількох підкладок, які розташовані в одній (рис. 6., ж, п, р) і в декількох реакційних камерах (рис. 6., м, о) залежно від вимог конкретного процесу травлення. У більшості реакторів розряд у камері реакцій збуджується за допомогою електродних і безелектродних ВЧ- і НВЧ-розрядів. Електроди виконані у вигляді плоских пластин з отворами, через які протікає потік газу.

З метою більш повної доставки ХАЧ потоком газу із плазми до підкладок стінки розрядної камери охолоджують, а в реакційній зоні встановлюють вкладиш з оксиду алюмінію (рис. 6., з). Це зменшує втрати ХАЧ при взаємодії зі стінками реактора і дозволяє збільшити швидкість травлення вдвічі. Ефективне збереження ХАЧ відбувається при використанні додаткових електродів, з'єднаних з ВЧ-генератором. Ці електроди підтримують розряд у каналах, по яких транспортуються активні частки (рис. 6., о). Такий пристрій є особливо ефективним при розташуванні на значній відстані підкладок від розрядної зони. У реакторах розрядну зону можна розташувати так, що випромінювання плазми не буде потрапляти на підкладки (рис. 6., і - л) і, отже, полегшиться процес візуального контролю травлення. Можливе використання крана або вентиля між камерою реакцій і розрядною камерою (рис. 6., м). Ступінь відкриття крана (вентиля) дозволяє регулювати умови травлення. Поділ розрядної і реакційної зон може здійснюватися за допомогою магнітного поля, що перешкоджає проникненню заряджених часток до підкладок.

Для реалізації процесів РТ при низьких тисках (менше 1 Па) використовуються також системи з іонними та плазовими джерелами. При цьому або зразки містяться на підкладкотримачі зворотною стороною до виходу джерела, або в просторі між джерелом і реакційною камерою встановлюються колекторні пластини, що виділяють з іонного або плазового пучків заряджені частки.

3. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом флюоресценції та методом змочування

Методи флюоресценції і змочування застосовуються для контролю органічних забруднень змішаного роду, таких як мастила, залишки мастильно-охолоджуючих рідин, сліди рук, пилу тощо.

При люмінесцентному методі проводиться візуальний огляд виробів при його висвітленні газорозрядною лампою через ультрафіолетовий світлофільтр. Ступінь забруднення вимірюється методом порівняння інтенсивності люмінесцентного світіння, у видимому діапазоні спектра електромагнітного випромінювання (0,4-0,8 мкм), досліджуваної речовини з речовиною, прийнятою за еталон.

Метод змочування - якісний метод, використовується для контролю зажиреності поверхні.

При контролі чистоти поверхні тестового зразка методом змочування виконується його плавне занурення і витяг в горизонтальному положенні у дистильовану воду при температурі води 25⁰С. Заміряється час руйнування водної плівки на поверхні зразка. Якість очищення поверхні тестового зразка від жирових забруднень визначається за ступенем змочування поверхні зразка водяною плівкою, та часом руйнування водяної плівки.

Опис лабораторних установок

Призначення установок плазмохімічного травлення.

Установки ПХТ призначені для плазмохімічного видалення забруднень і переддифузійного очищення поверхні виробів.

Живлення установок ПХТ здійснюється від 4-провідної з нульовим проводом мережі змінного струму напругою 220/380 В, частотою 50 Гц. Норми якості електричної енергії за ГОСТ 13109-67

Для експлуатації установок ПХТ до них необхідно подавати:

- азот газоподібний сорт І ГОСТ 9.293-74;
- хладон 14 МРТУ 6-02-922-74;
- кисень газоподібний технічний сорт 1 ГОСТ 5583-68.

Під тиском $30 \times 10^4 \div 49 \times 10^4 \pm 4,9 \times 10^4$ Па ($3 \div 5 \pm 0,5$ кгс/см²).

Для експлуатації установок ПХТ вихлопний патрубок їх вакуумних насосів необхідно приєднати до системи витяжної вентиляції.

Технічні дані установок ПХТ

Табл. 2

№	Параметр	Установка ПХТ з ЄЗР	Установка ПХТ з ІЗР
1.	Габаритні й встановочні розміри установки ПХТ з ЄЗР відповідають вказаним на рис.	7	7
2.	Час відкачування вакуумної системи до тиску 2,7 Па (2×10^{-2} мм.рт.ст.) не більше, хв	2,5	2,5
3.	Анодний струм не більше, А	0,95	0,8
4.	Струм сітки генератора не більше, мА	90	80
5.	Вихідна потужність генератора не менше, кВт	0,4	0,6
6.	Робоча частота генератора, кГц	$13560 \pm 1\%$	$13560 \pm 1\%$
7.	Максимальна електрична потужність, споживана установкою не більше, кВт	3	2,5
8.	Витрата азоту не більше, л/г	10	5
9.	Витрата хладону 14 не більше, л/г	10	5
10.	Витрата кисню не більше, л/г	15	15

Склад обладнання

Установка ПХТ з ЄЗР (див.рис.7) складається з наступних блоків виробів:

- блоку обробки 2 – 1 шт.
- блоку вакуумної відкачки 1 – 1 шт.
- блоку керування 3 – 1 шт.

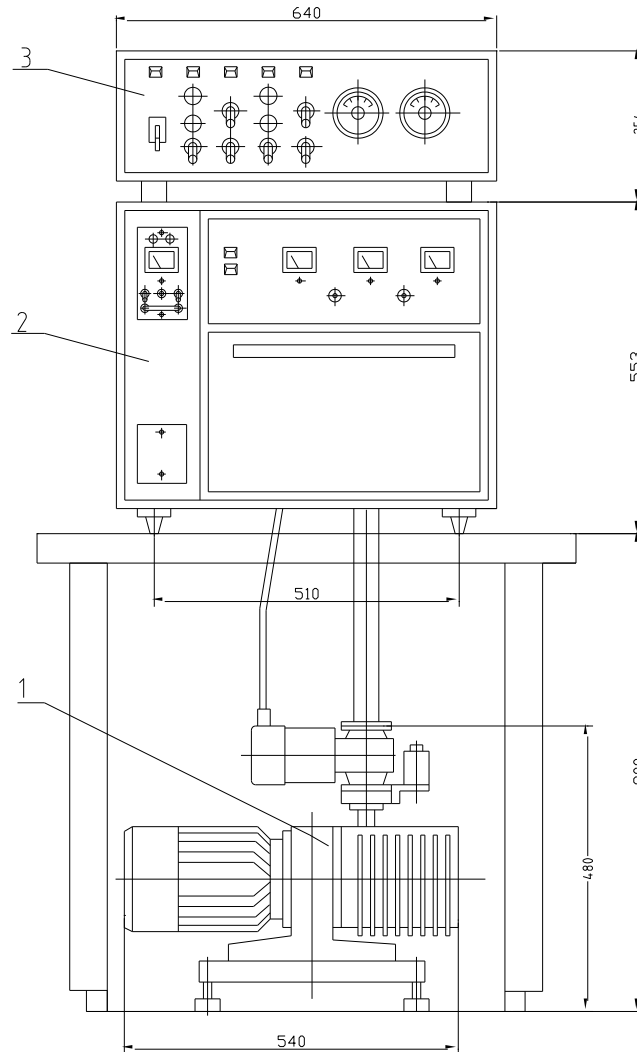


Рис.7(а). Схема установки плазмохімічної обробки (плазмової очистки), що включає плазмовий реактор з конденсаторним або індуктивним збудженням плазми і вакуумно-газову систему.
1 – блок вакуумної відкачки, 2 – блок обробки (плазмового реактора), 3 – блок керування.

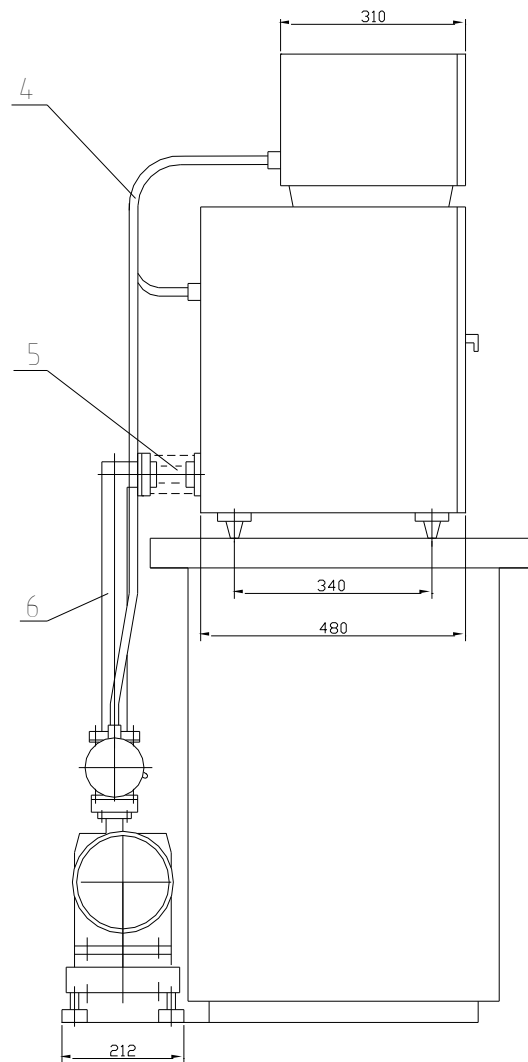


Рис.7(б). Схема установки плазмохімічної обробки (плазменної очистки), що включає плазменний реактор з конденсаторним або індуктивним збудженням плазми і вакуумно-газову систему
4 – електричні кабелі, 5 – сильфонний вузол, 6 – патрубок для відкачки.

Устрій і робота установок ПХТ з ємкісним збудженням розряду (ЄЗР) та індуктивним збудженням розряду (ІЗР).

Установка ПХТ складається з блоку керування 1 (рис.8), який здійснює керування технологічним процесом ПХТ, генератора ВЧ 2, що задає частоту для плазмохімічного реактора 3, та блока вакуумної відкачки 4. Генератор ВЧ та плазмохімічний реактор конструктивно об'єднані в один блок – блок обробки.

Зразок поміщається в плазмохімічний реактор. Після подачі напруги здійснюється відкачка плазмохімічного реактора 3 блоком 4. Вмикається на прогрів генератор ВЧ 2. Після прогріву генератора з блоку керування 1 вмикаються клапани подачі робочих газів до плазмового реактора. Після стабілізації тиску робочих газів в реакторі з блоку керування вмикається висока напруга і починається процес плазмохімічного травлення. По закінченню процесу плазмохімічного травлення вимикається висока напруга, на блоці керування вмикаються клапани подачі суміші газів у робочу камеру. Припиняється відкачування робочої

камери відключенням блоку вакуумної відкачки з блоку керування. Вмикається клапан подачі азоту в робочу камеру, коли тиск у камері досягне атмосферного тиску, припиняється подача азоту. По закінченню подачі азоту в камеру відчиняються дверці робочої камери і виймається зразок, що оброблювався.

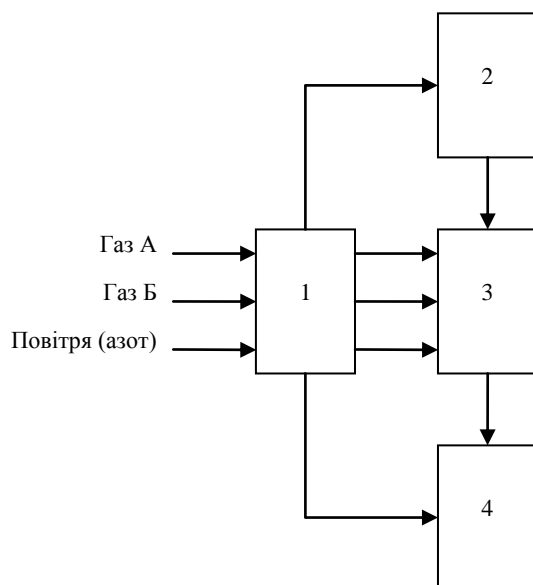


Рис.8 Схема установки ПХТ

1 – блок керування, 2 – генератор ВЧ, 3 – плазмохімічний реактор, 4 – блок вакуумної відкачки.

Розглянемо роботу установок ПХТ з ЄЗР та ІЗР більш детально.

Блок обробки установки ПХТ з ЄЗР (див.рис.7) з'єднується з блоком вакуумної відкачки 1, сильфонним вузлом 5 і патрубком 6. Електрозв'язок здійснюється джгутом 4.

Принцип роботи установки ПХТ з ЄЗР заснований на застосуванні низькотемпературної плазми для травлення діелектричних забруднень і видалення фоторезисту з поверхні виробів.

Плазма утворюється в камері при розрідженні порядку $40 \div 133$ Па ($0,3 \div 1,0$ мм рт.ст.), коли до обкладок ємностей, розташованих над камерою в установці ПХТ з ємкісним збудженням розряду, або до індуктора, розташованому навколо камери в установці ПХТ з індуктивним збудженням розряду, подається високочастотна напруга.

При напуску в камеру кисню до тиску $133 \div 195$ Па ($1 \div 1,5$ мм. рт. ст.) в камері утворюється атомарний кисень і іони кисню, що мають високу хімічну активність. Вони окислюють забруднення, утворюючи в результаті хімічних реакцій леткі сполуки, відкачувані з камер вакуумним насосом.

При напуску в камеру фреону 14 до тиску $40 \div 68$ Па ($0,3 \div 0,5$ мм. рт. ст.) утворюється атомарний фтор, який в результаті хімічної реакції очищає поверхню виробів від окислів і забруднень.

Також травлення діелектричних забруднень може здійснюватись за напуску в камеру суміші хладону 14 з киснем до тиску порядку $40 \div 70$ Па ($0,3 \div 0,5$ мм рт.ст.).

Блок вакуумної відкачки 1 складається з насоса вакуумного 1 (рис.9), закріпленого на рамі 4. До відкачного патрубка насоса приєднаний через перехідний фланець клапан вакуумний 2, при включенні якого відбувається відкачування камери насосом.

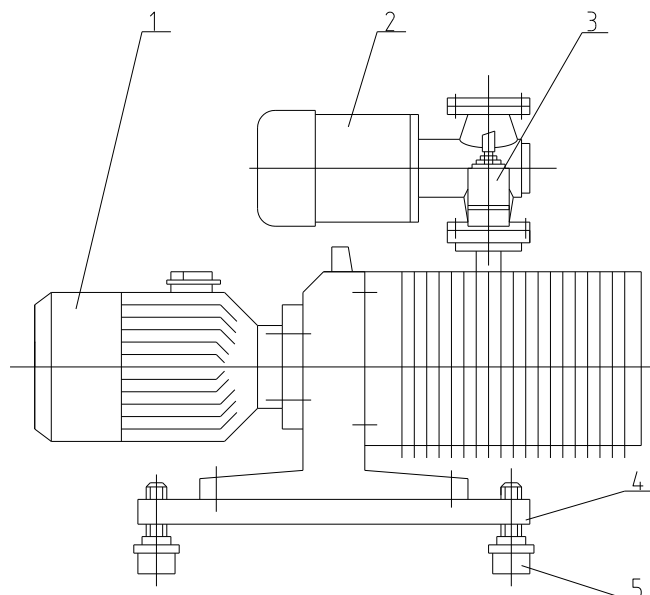


Рис.9. Блок вакуумної відкачки.

1 - механічний форвакуумний насос (2)НВР-5Д, 2 - клапан вакуумний, 3 – клапан вакуумний, 4 – рама, 5 – ніжка.

За допомогою ніжок 5 здійснюється регулювання блоку по висоті і гаситься вібрація. Клапан 3 служить для напуску повітря в насос після його зупинки.

Блок керування

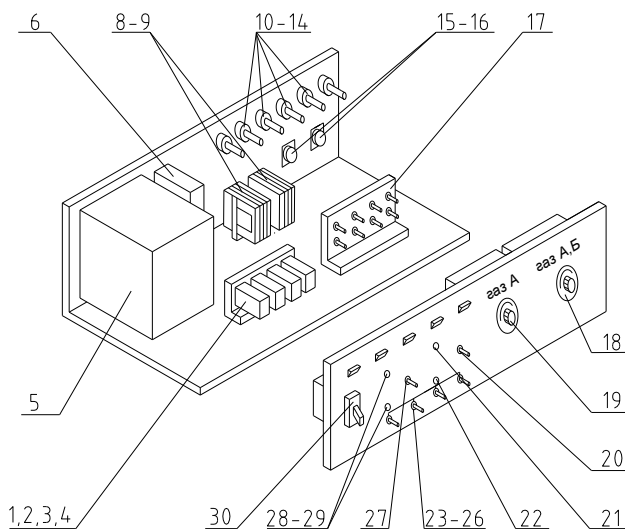


Рис. 10. Блок керування:

1, 2, 3, 4 – проміжне реле; 5 – програмне реле часу ВС-10; 6 – магнітний пускач; 8, 9 – понижуючі трансформатори; 10, 11, 12, 13, 14 – запобіжники; 15, 16 – роз'єми; 17 – випрямні мости; 18, 19 – реле часу; 20 – перемикач; 21, 22 – кнопки керування; 23, 24, 25, 26 – тумблери ручного керування клапанами; 27 – тумблер вмикання накали ламп; 28, 29 – кнопки керування насосом; 30 – автомат подачі мережевої напруги.

До складу установок ПХТ з ЄЗР та ІЗР входить блок керування. Блок керування (рис.10) являє собою пристрій, що складається з шасі з задньою стінкою і передньою панеллю, що

забезпечує напівавтоматичний або ручний режим роботи установки ПХТ з ЄЗР по 2-м програмам:

1 - з одним газом (сумішшю хладону 14 з киснем) - для травлення діелектричних забруднень;

2 - з двома газами: спочатку суміш хладону 14 з киснем, а потім з одним киснем - для травлення діелектричних забруднень

На шасі розташовані:

- проміжні реле 1 ÷ 4 блокування і управління виконавчими механізмами;
- програмне реле часу ВС-10; 5;
- магнітний пускач 6;
- понижуючі трансформатори 8-9;
- випрямні мости 17;

На передній панелі змонтовані:

- реле часу 18-19 для встановлення часу відпрацювання з газом А і газом Б, перемикач 20 режимів роботи з газом А або з газами А, Б;
- кнопки «Пуск», «Стоп» управління процесом 21 - 22;
- тумблери 23 ÷ 26 ручного управління клапанами;
- тумблер 27 включення накалу ламп;
- кнопки 28 ÷ 29 «Пуск», «Стоп» управління насосом;
- автомат подачі напруги 30.

На задній стінці шасі розташовані:

- запобіжники 10 ÷ 14 для захисту двигуна і ланцюгів управління
- роз'єм 15 ÷ 16 для приєднання джгута.

Установка ПХТ з ЄЗР

В установці ПХТ з ЄЗР блок обробки 2 включає в себе корпус, в якому розміщуються: камера 3 (рис. 11.), Генератор ВЧ 2, вакуумметр 13ВТЗ-003, вентилятор 8 для охолодження камери і приладів генератора, узгоджуючий пристрій 5 для узгодження в резонанс коливального контуру генератора з коливальним контуром камери. Камера, генератор, узгоджуючий контур для зручності обслуговування, складання виконані окремими вузлами. У задній частині основи корпусу кріпляться панель розподільча 10, в яку входять 3 стабілізатора тиску і 3 манометра (для кисню, хладону 14 і азоту), змішувач 9 для змішування кисню і хладону 14; блок клапанів 1, регулятор температури РТ-049, 13.

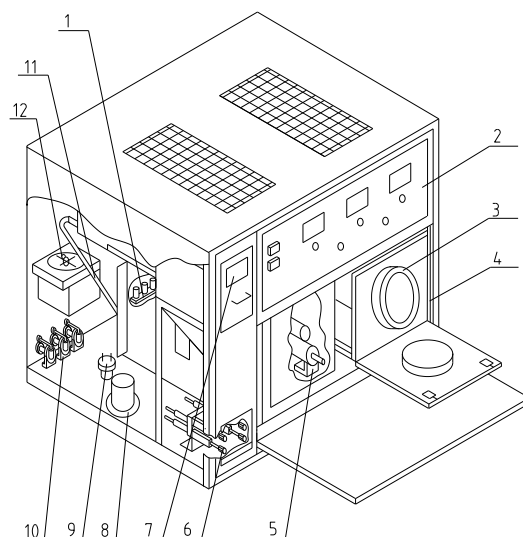


Рис.11. Блок обробки установки ПХТ з ЄЗР

1 – блок клапанів, 2 – джерело живлення плазмового реактора, 3 – плазмовий реактор, 4 – мікроперемикач блокування, 5 – пристрій підстройки електричного режиму реактора, 6 – натікач, 7 – вакуумметр, 8 – вентилятор. 9 – газовий змішувач, 10 – газорозподільча панель, 11 – кабель для електричного живлення реактора, 12 – пристрій для регулювання температури в реакторі.

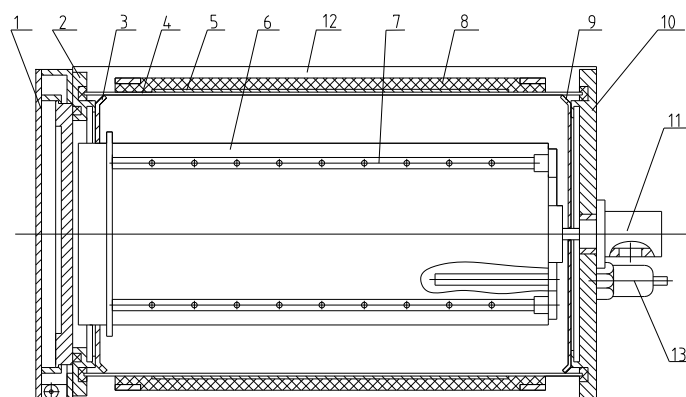


Рис. 12. Камера (плазмовий реактор з конденсаторним збудженням плазми).

1 – дверцята, 2 – фланець, 3 – екран, 4 – кварцова труба, 5 – планка, 6 – перфорований циліндр, 7 – колектор, 8 – обкладка конденсатора, 9 – екран, 10 – фланець, 11 – корпус, 12 – розпірка, 13 – термометр опору;

Камера 3 (рис. 12) установки ПХТ з ЄЗР складається з кварцової труби 4 \varnothing 200мм, що спереду герметично ущільнюється дверцятами 1. Ззаду герметичне ущільнення створюється по торцю труби гумовою прокладкою у фланці 10. Камера приєднується за допомогою корпусу 11 через сильфонний вузол у вакуумній системі. Всередині камери розташований колектор газовий 7 і перфорований циліндр 6. Екрани 3 і 9 запобігають руйнівному впливу плазми на гумові прокладки. Високочастотна напруга від генератора підводиться до обкладок 8, які кріпляться до планок 5. Розпірки 12 здійснюють стягування і жорстке кріплення фланців 2 і 10 до торців кварцової труби. Розпірки служать одночасно і направляючими при установці камери в блок обробки. Термометр опору 13 видає сигнал при досягненні в камері заданої температури.

Плазмовий реактор з ємнісним збудженням плазми представляє з себе квадрупольну систему з ємнісним збудженням розряду з зовнішнім розташуванням електродів. На Рис. 13 представлено схематичне зображення цієї системи і розподіл електричного поля всередині неї. У ній силові лінії поля зосереджені головним чином поблизу внутрішньої поверхні стінок реактора завдяки специфічній формі електродів квадрупольного конденсатора. Оброблюваний металевий зразок не сильно заважає проходженню електричного струму в плазмі. Хімічно активні плазмові частинки (іони, збуджені молекули, радикала, фотони тощо) генеруються біля внутрішньої поверхні стінок реактора, звідки ці частинки дифундують у внутрішню область реактора до зразка, забезпечуючи більш-менш рівномірну обробку його поверхні.

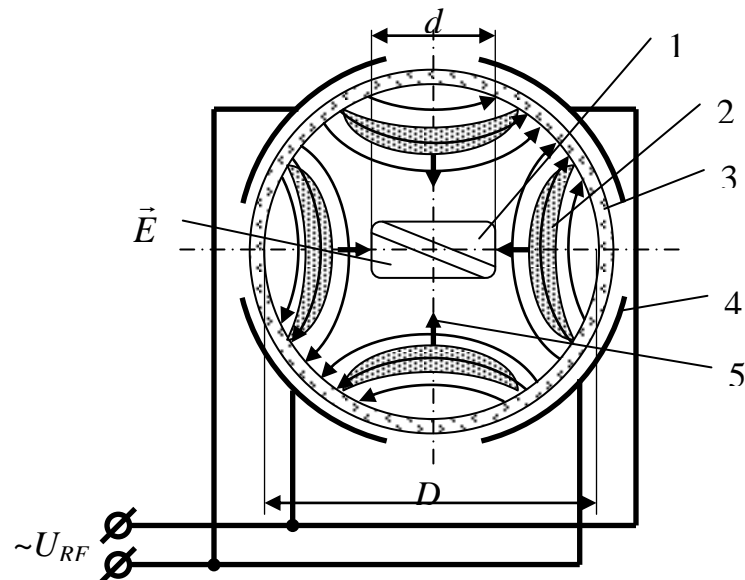


Рис. 13. Квадрупольні система з ємнісним збудженням розряду.
 1 - оброблюваний зразок; 2 - область іонізації газу і генерації плазми; 3 - стінка реактора; 4 - електроди конденсатора (електроди для порушення ВЧ розряду); 5 - напрямок дифузії хімічно активних, нейтральних і заряджених частинок; D - внутрішній поперечний розмір реактора; d - максимальний поперечний розмір оброблюваного зразка; E - силові лінії електричного поля; U_{RF} - ВЧ напруга, що прикладається.

З метою забезпечення рівномірної обробки тестового зразка в ході плазмохімічного травлення та мінімізації спотворень в картину розподілу електричних полів всередині плазмового реактора, вона розміщується в центрі плазмового реактора на підставці, як показано на Рис. 14 і Рис. 15. Підставка виготовлена зі скла з метою зменшення спотворень, які вона може вносити в картину розподілу електричних і магнітних полів всередині плазмового реактора.

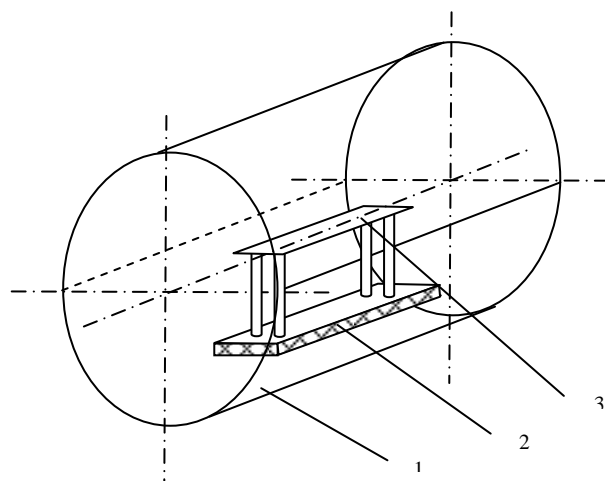


Рис. 14 Розміщення тестового зразка у плазмовому реакторі.
(1 - стінки плазмового реактора, 2 - скляна підставка для тестових зразків, 3 - тестовий зразок)

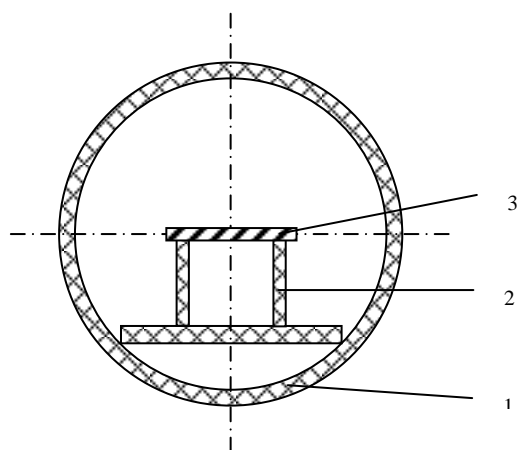


Рис. 15 Розміщення тестового зразка всередині плазмового реактора.
(1 - стінки плазмового реактора, 2 - скляна підставка для тестових зразків, 3 - тестовий зразок)

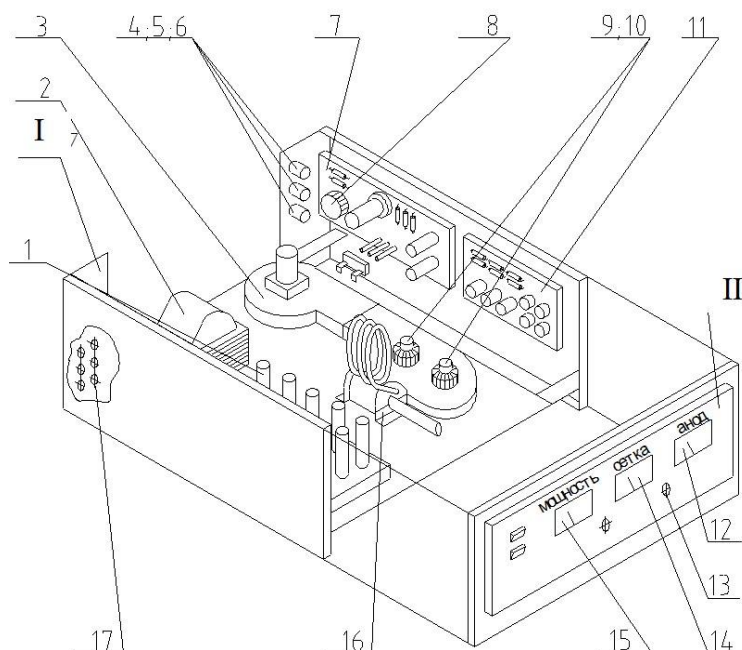


Рис. 16. Генератор ВЧ (джерело живлення плазмового реактора).

1 - плата помножувача випрямленої напруги мережі з виходом 1300 В, 2 – трансформатор живлення, 3, 11 - тетроди генераторні, 4, 5, 6 – запобіжники, 7 - плата низьковольтного джерела живлення, 8 – потенціометр, для стабілізації та регулювання, 9,10 – тетроди генераторні, 11 - плата генератора, що задає ВЧ, 12 - амперметр, що вимірює загальний анодний струм, 13 - змінний резистор для регулювання вхідної потужності, 14 - міліамперметр, що вимірює струм сітки, 15 – індикатор ВЧ потужності, 16 - змінний (підстроєчний) конденсатор, 17 – гнізда для вимірювання напруги та частоти.

Генератор 2 включає в себе всі необхідні елементи для самостійної роботи і налаштування (рис. 16), складається з каркаса I і передній панелі II.

На каркасі розташовані такі елементи:

- плата помножувача 1 випрямленої напруги з виходом 1300В.
- плата низьковольтного стабілізованого і регульованого потенціометром 8 джерела напруги 7.
- плата задаючого генератора високої частоти 11;
- вентилятор 3 для охолодження тетродів генераторних 9, 10 підсилювача потужності
- пристрій узгоджувач 16;
- трансформатор живлення 2;
- запобіжники 4, 5, 6.

На передній панелі розташовані:

- амперметр 12, вимірює загальний анодний струм;
- міліамперметр 14, вимірює сітковий струм;

- індикатор 15 потужності, що надходить в навантаження;
- змінний резистор 13 для регулювання вихідної потужності.

На задній панелі генератора розташовані гнізда 17 для вимірювання тиску і частоти.

Опис схеми пневмовакуумної принципової установки ПХТ з ЄЗР (рис. 17).

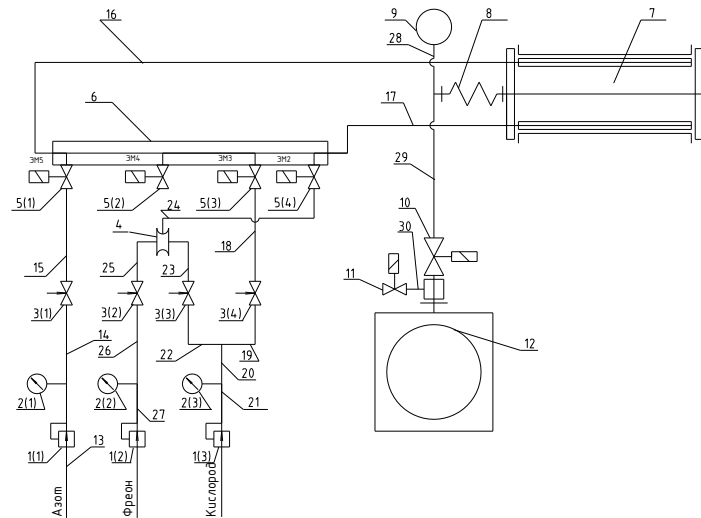


Рис. 17. Схема пневмовакуумна принципова.

1(1)...1(3) – стабілізатор тиску повітря СДІ-1,6;
 2(1)...2(3) – стрілочний манометр МТ-4; 3(1)...3(3) –
 натікач; 4 – змішувач; 5(1)...5(3) – клапан вакуумний; 6 –
 корпус; 7 – плазмовий реактор; 8 – вузол сильфонний;
 9 – перетворювач манометричний ПМТ-6-3; 10 –
 клапан магнітний; 11 – клапан вакуумний; 12 –
 механічний насос (2)НВР-5Д4 13-30 – трубопроводи та
 патрубки.

Подача газів в установку ПХТ з ЄЗР може здійснюватися як від індивідуальних джерел (балонів), так і з централізованої мережі тиском в межах від $30 \times 10^4 \div 49 \times 10^4$ Па ($0,3 \div 0,5$ кгс/см²).

Тиск газу, що надходить на вхід натікачів 3(1) ... 3(4) (азот, хладон, кисень), підтримується стабілізаторами тиску 1(1) ... 1(3) і контролюється за показаннями манометрів 2(1) ... 2(3).

Необхідна величина вакууму в камері в процесі обробки виробів підтримується натікачами 3(1) ... 3(4). За допомогою натікачів 3(2) і 3(3) також забезпечується необхідне процентне співвідношення кисню і фреону, що надходять в змішувач 4.

Тривалість і черговість напуску того чи іншого газу в камеру 7 здійснюється за допомогою клапанів вакуумних 5(1) ... 5(3), 5(4), розгерметизація камери відбувається за допомогою клапана 5(2), що включаються по команді від блоку керування (автоматично в заданому режимі або вручну при налаштуванні) і сполученими з камерою за допомогою корпусу 6.

Відкачування газів з камери здійснюється насосом 2НВР-5д 12 при включенні клапана 10. Насос сполучений з камерою через сильфонний вузол 8. Клапан 11 забезпечує подачу повітря в насос, клапан 10 при цьому закритий. Перетворювач ПМТ-6-3 9 служить для контролю величини вакууму.

Установка ПХТ з ІЗР

В установці ПХТ з ІЗР блок обробки (рис. 18) включає в себе камери 3, генератор ВЧ 2, вакуумметр ВТБ-14, систему вентиляції 5 для охолодження камер і приладів генератора.

Камери й генератор ВЧ виконані для зручності обслуговування і збірки окремими вузлами. Біля задньої панелі розміщуються: панель розподільча 6 з двома манометрами, двома регуляторами тиску і двома натікачами і блок клапанів 1.

Блок клапанів здійснює своєчасну подачу газів в камери, а ручками стабілізаторів і натікачів на розподільчій панелі регулюються тиск і величина потоку газів.

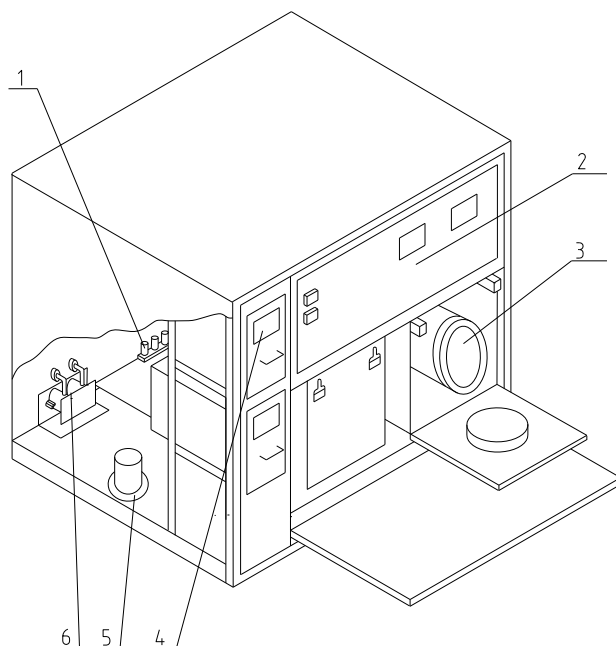


Рис. 18. Блок обробки установки ПХТ з ІЗР.

1 – блок клапанів, 2 – джерело живлення плазмового реактора (генератор ВЧ), 3 – плазмовий реактор (камери), 4 – вакуумметр, 5 – вентилятор, 6 – газорозподільча панель.

За допомогою блоку клапанів здійснюється своєчасна подача того чи іншого газу в камеру, а з допомогою натікачів 6 здійснюється необхідне підтримання тиску в камері в процесі обробки виробів, а також необхідне співвідношення кисню і хлорону 14 при натіканні їх у суміші.

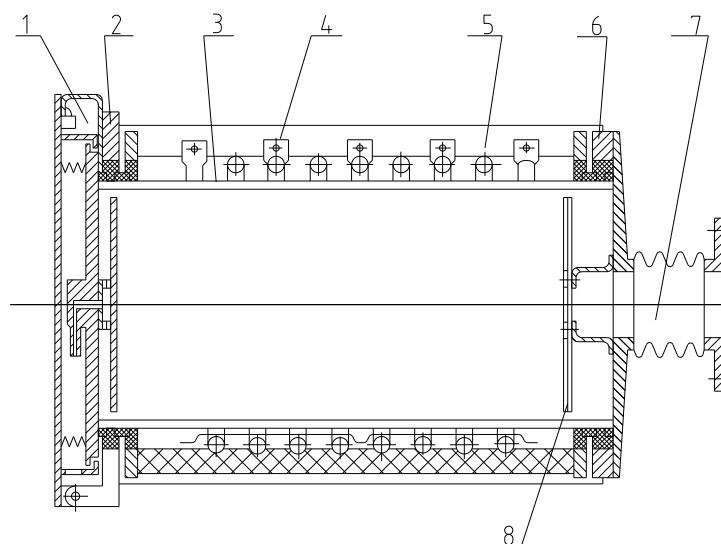


Рис. 13. Плазмовий реактор (камера) з індукційним збудженням плазми;

1 – дверцята, 2, 6 – фланці, 3 – кварцова труба реактора, 4 – індуктор, 5 – розпорка, 7 – сильфонний вузол, 8 – екран.

Камера установки ПХТ з ІЗР (рис. 19) складається з кварцової труби 3, що спереду герметично ущільнюється дверцятами 1, а ззаду приєднаної через сильфонний вузол 7 до вакуумної системи.

Трубу оперізують витки індуктора ВЧ 4. Фланці 2 і 6 з розпірками 5 пов'язують всі складові частини в єдиний закінчений вузол. Контакт плазми з фланцем сильфонного вузла усунутий екраном В.

Таким чином, плазмовий реактор з індуктивним збудженням плазми являє собою систему з індуктивним збудженням розряду і зовнішнім розташуванням котушки індуктора. На рис. 20 представлено схематичне зображення системи з індуктивним збудженням розряду і зовнішнім розташуванням індуктора, а також розподіл електричних полів всередині неї. Силкові лінії поля зосереджені головним чином поблизу внутрішньої поверхні стінок реактора через скін-ефекту, де зразок не заважає проходженню електричного струму в плазмі. Тут же генеруються хімічно активні плазмові частинки (іони, збуджені молекули, радикали, фотони тощо). Ці частинки дифундують у внутрішню область реактора до зразка, забезпечуючи більш-менш рівномірну обробку його поверхні.

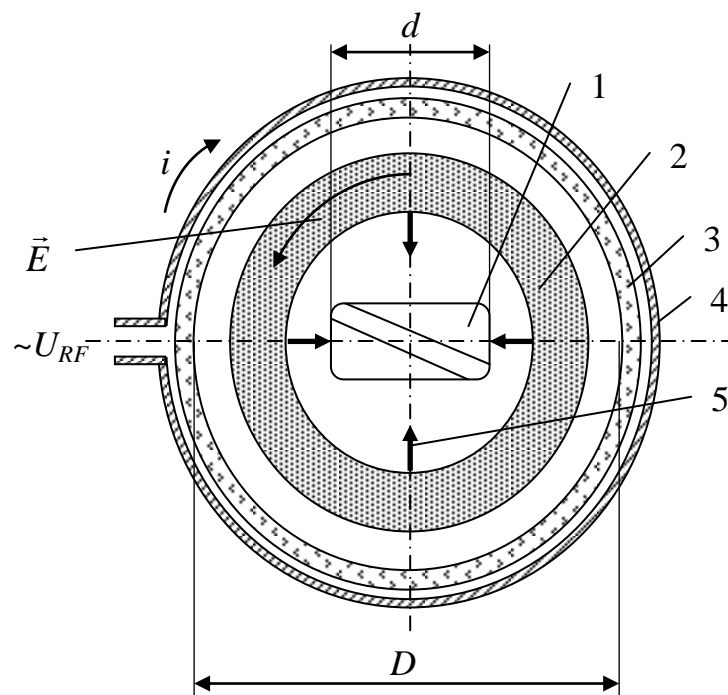


Рис. 20. Система з індуктивним збудженням розряду.
 1 - оброблюваний зразок; 2 - область іонізації газу і генерації реакційної плазми; 3 - діелектрична стінка реактора; 4 - виток зовнішнього індуктора; 5 - напрямок дифузії плазмових частинок до зразка; D - внутрішній поперечний розмір реактора; d - максимальний поперечний розмір оброблюваного зразка; E - силові лінії електричного поля; U_{RF} - ВЧ напруга, що прикладається; i - струм в індукторі.

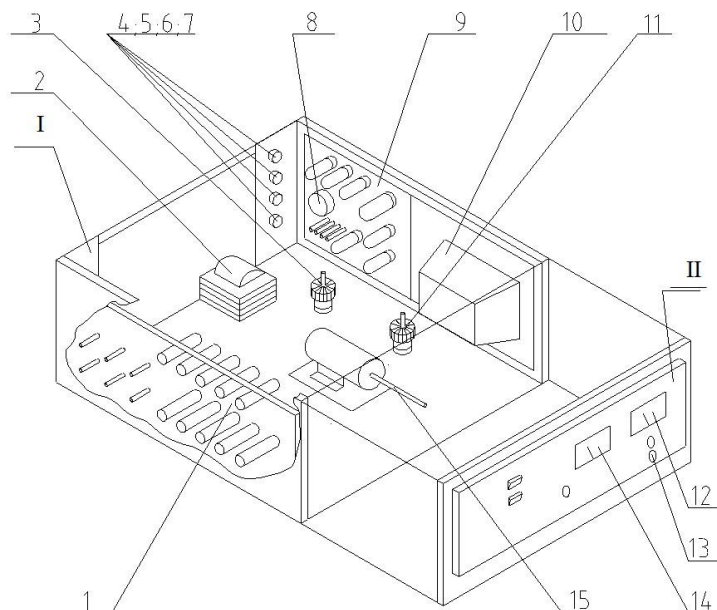


Рис. 21. Генератор ВЧ (джерело живлення плазмового реактора).
 1 - плата помножувача випрямленої мережевої напруги з виходом 1300 В, 2 – трансформатор живлення, 3, 11 - тетроди генераторні, 4, 5, 6, 7 – запобіжники, 8 – потенціометр, 9 - плата низьковольтного джерела

напруги, що стабілізується та регулюється, 10 - плата генератора, що задає ВЧ, 12 - амперметр, що вимірює загальний анодний струм, 13 - змінний резистор для регулювання вхідної потужності, 14 - міліамперметр, що вимірює струм сітки, 15 – змінний (підстроєчний) конденсатор.

Генератор включає в себе всі необхідні елементи для самостійної роботи і налаштування (рис. 21), складається з каркаса I і передньої панелі II.

На каркасі розташовані такі елементи:

- Плата помножувача 1 випрямленої мережевої напруги з виходом 1300В.
- Плата низьковольтного стабілізованого і регульованого потенціометром 8 джерела напруги 9.
- Плата задаючого генератора високої частоти 10
- тетроди генераторні 3, 11 підсилювача потужності
- Змінний (підстроєчний) конденсатор 15
- Трансформатор живлення 2
- Запобіжники 4, 5, 6, 7.

На передній панелі розташовані:

- Амперметр 12, вимірює загальний– анодний струм;
- Міліамперметр 14, вимірює– сітковий струм;
- Змінний резистор 13 для– регулювання вхідної потужності.

Опис схеми пневмо-вакуумної принципової.

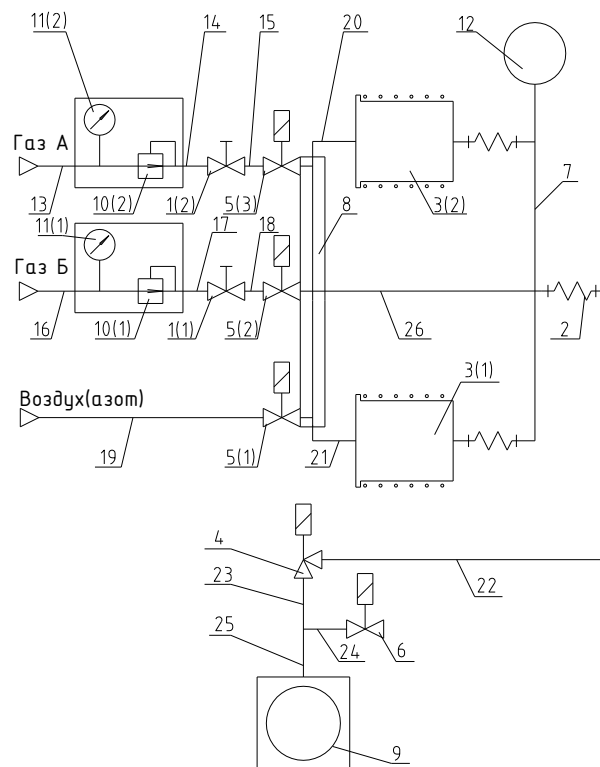


Рис.22. Схема пневмовакuumна принципова.

1(1)...1(2) – натікач; 2 – вузол сильфонний; 3(1)...3(2) – камера; 4 – клапан; 5(1)...5(3) – клапан вакуумний; 6 – клапан вакуумний; 7 – трійник; 8 – корпус; 9 – насос 2НВД-5Д ГОСТ14707-69; 10(1)...10(2) – стабілізатор тиску повітря СДВ-1,6 ГОСТ 14267-69; 11(1)...11(2) – манометр, що показує МТ-4 в корпусі без фланця та осьовим розташуванням штуцера, верхня межа вимірювання $1,6 \text{ кгс/см}^2$; 12 – перетворювач манометричний теплоелектричний ПМТ-Б-3 13-26 – лінії зв'язку.

Подача газів в установку ПХТ з ІЗР може здійснюватися як від індивідуальних джерел (балонів), так і з централізованої мережі тиском в межах від $4,9 \times 10^4 \div 59 \times 10^4 \text{ Па}$ ($0,5 \div 6 \text{ кгс/см}^2$). Необхідний для процесу тиск задається по манометрам 11 (1), 11 (2) і підтримується стабілізаторами тиску 10 (1), 10 (2) (див рис. 22).

Величина напусків газів в камері 3 (1), 3 (2) регулюється натікачами 1 (1), 1 (2), а час і черговість напуску забезпечується клапанами електропневматичними 5 (1), 5 (2), 5 (3), що спрацьовують по команді з блоку керування (автоматично в заданому режимі або вручну - при налаштуванні) і сполученими з камерами за допомогою колектора 8 і трійника 7.

Необхідне для роботи розрідження створюється насосом вакуумним 9, що відсікається від камер клапаном 4 по команді з блоку керування. При виключенні насоса 9 спрацьовує клапан 6, відкриваючи доступ повітря в насос, клапан 4 в цей момент закритий.

Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися із змістом методичних вказівок. Рекомендується додатково вивчити науково-технічну літературу по плазмохімічному травленню і його застосуванню в технології.

До лабораторної роботи допускаються студенти, що заздалегідь вивчили матеріал по плазмохімічному травленню, пройшли співбесіду з викладачем по темі роботи і підготували заготовку звіту.

2. Провести контроль чистоти поверхні тестового зразка методами змочування та флюоресценції до проведення ПХТ.

Процедура контролю методом змочування до процесу ПХТ проводиться за 1 годину до обробки на установці ПХТ для того, щоб зразок встиг висохнути до початку плазмохімічної обробки.

Контроль чистоти поверхні зразка в ультрафіолеті виконується, опромінюючи його за допомогою ультрафіолетової лампи SYLVANIA H44G6-100/MDSK, до обробки на установках ПХТ не більше ніж за 5 хвилин до початку процесу плазмохімічного травлення. Якість очищення поверхні тестового зразка визначається за ступенем люмінесцентного світіння на поверхні зразка.

3. Підготувати установку до проведення роботи. Для цього перевірити підключення до корпусу установки захисного заземлення і цілісність ізоляції мережевого шнура живлення, а також елементів на передній панелі. А також, провести зовнішній огляд блоків та виробів установки ПХТ з ЄЗР. Відкрити двері блоку обробки, дверцята камери. Переконалися у відсутності на камері тріщин, сколів. Закрити дверцята камери, двері блоку.

Лабораторну роботу виконувати тільки у присутності викладача або лаборанта після проведення інструктажу по техніці безпеки.

4. Встановіть ручки тумблерів у вихідне положення згідно рис. 10

5. Подайте напругу на установку ПХТ з ЄЗР (ІЗР) за допомогою автомата на панелі блоку керування, повинна засвітитися лампочка «Мережа».

6. Увімкніть вакуумний насос кнопкою «Пуск».

7. Включити вакуумметр кнопкою «Мережа» - повинна спалахнути лампочка «Мережа» на вакуумметри ВТ13-003 і дати йому прогрітися протягом 15 хв., Відповідно до технічного опису і інструкції з експлуатації вакуумметра ВТ13-003.

8. Увімкніть тумблер «Накал», повинна спалахнути лампочка «Накал» і прогріти установку ПХТ з ЄЗР (ІЗР) протягом 15 хв.

9. Включити витратомір (O_2) і витратомір (CF_4) і дати їм прогрітися протягом 15хв., Відповідно до технічного опису і інструкції з експлуатації витратомірів типу FMA.

10. Відкрити крани газових балонів з киснем, фреоном і азотом.

11. За допомогою газових редукторів, встановленими на газових балонах, виставити тиск у газових системах рівним 2 атм.

12. Відкрити кульові крани подачі газів «КИСЕНЬ», «ФРЕОН» і «АЗОТ» розташовані на газорозподільній системі.

13. Відкрийте дверцята блоку обробки і камери, поставте зразок встановлений в утримувач в камеру. Зачиніть двері камери і блоку.

14. Відкачати об'єм робочої камери, включивши тумблер «7», групи тумблерів «Ручне управління клапанами», до залишкового тиску не більше 20 Па.

15. Включити тумблер «4», клапана подачі суміші газів кисню і фреону, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і здійснити подачу суміші газів у робочу камеру.
 16. Витратоміром (O_2) виставити швидкість потоку газу рівним 8 sccm.
 17. Витратоміром (CF_4) виставити швидкість потоку фреону рівним 42 sccm.
 18. Переконавшись, що тиск в робочій камері стабілізувався і дорівнює 65 Па (3,8 В за шкалою приладу Вакуумметри ВТ13-003).
 19. Включити тумблер «Висока напруга».
 20. Для установки ПХТ з ЄЗР ручкою підстроювання добротності контуру добитися максимальної потужності падаючої хвилі.
 21. Провести плазмохімічне травлення протягом 15 хв.
 22. Вимкнути тумблер «Висока напруга».
 23. Вимкнути тумблер «4», клапана подачі суміші газів кисню і фреону, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і припинити подачу суміші газів у робочу камеру.
 24. Припинити відкачування робочої камери, вимкнувши тумблер «7», групи тумблерів «Ручне управління клапанами».
 25. Включити тумблер «6», клапана подачі азоту, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і здійснити подачу азоту в робочу камеру.
 26. Коли тиск у камері досягне атмосферного тиску, припинити подачу азоту, вимкнувши тумблер «6», клапана подачі азоту, групи тумблерів «Ручне управління клапанами».
 27. Відкрити дверцята блоку і камери, вийняти зразок встановлений в утримувач.
 28. Провести контроль чистоти поверхні зразка методом флюоресценції та методом змочування.
- Після обробки на установках ПХТ контроль методом змочування проводиться не пізніше ніж через 10 хв. після закінчення процесу плазмохімічного очищення, але після контролю чистоти поверхні тестового зразка методом люмінесценції. Контроль чистоти поверхні зразка в ультрафіолеті виконується, після обробки на установках ПХТ не пізніше ніж через 5 хв. після закінчення процесу плазмохімічного травлення.
29. Після завершення технологічного процесу витратоміром (O_2) і витратоміром (CF_4) перекрити потік газів згідно TO / I - FMA - OMEGA - Mass Flow Controller.
 30. Перекрити кульові крани подачі газів «КИСЕНЬ», «ФРЕОН» і «АЗОТ», розташовані на газорозподільній системі.
 31. Перекрити газові редуктори, встановлені на газових балонах.
 32. Перекрити крани газових балонів з киснем, фреоном і азотом.
 33. Вимкнути після закінчення роботи тумблер «Накал» - погасне лампочка «Накал».
 34. Вимкнути вакуумметр кнопкою «Мережа» - погасне лампочка «Мережа» на вакуумметрі.
 35. Зупинити механічний вакуумний насос кнопкою «Стоп» - погасне лампочка «Насос».
 36. Зніміть напругу з установки ПХТ з ЄЗР автоматом «Мережа» - погасне лампочка «Мережа».
 37. Порівняти результати контролю чистоти поверхні до та після проведення ПХТ. Одержані дані занести в звіт.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити мету лабораторної роботи, спрощену схему лабораторної установки, короткий опис порядку виконання роботи, результати контролю чистоти поверхні зразку виконані методом змочування та методом флюоресценції до та після процесу ПХТ.

Контрольні питання

1. Дайте визначення низькотемпературній плазмі.
2. Класифікація плазми
3. Наведіть приклади процесів які реалізуються за допомогою низькотемпературної газорозрядної плазми.
4. Класифікуйте процеси травлення з використанням низькотемпературної газорозрядної плазми.
5. Яким вимогам повинні відповідати гази, що використовуються в процесах плазмохімічного травлення.
6. Механізм іонно-плазмового травлення.
7. Від чого залежить коефіцієнт розпилення.
8. Класифікуйте установки іонно-плазмового травлення.
9. Які типи реакторів ви знаєте?
10. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом флюоресценції.
11. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом змочування.
12. Які фактори підвищують швидкість травлення в плазмі?
13. Як впливає на травлення для різних матеріалів одночасне бомбардування поверхні зарядженими і різними нейтральними частками?
14. Як впливає на швидкість травлення матеріал з якого виготовлено електроди?
15. За яких умов можливе забезпечення високої анізотропії?
16. Як впливає на швидкість травлення вольфраму і анізотропію збільшення концентрації кисню?
17. В якій плазмі спостерігається найкраще плазмохімічне травлення титану?
18. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення алюмінію?
19. Чому необхідний строгий контроль за домішкою парів води, а також заходи з очищення та пасивування поверхні після травлення алюмінію?
20. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення міді? В чому проявляється особливість плазмохімічного травлення міді?
14. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення металів III групи? За рахунок чого досягається анізотропія при плазмохімічному травлення цих металів?
15. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення хрому?
16. В чому особливість плазмохімічного травлення оксидів металів?
17. Як підвищити селективність травлення діоксиду кремнію до кремнію?
18. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення органічних матеріалів?
19. Як збільшити стійкість полімерів в кисневмісній плазмі?

20. Від чого залежить швидкість полімеризації?
21. Виходячи з яких міркувань повинен вибиратись склад плазми щоб досягти високої анізотропії плазмохімічного травлення органічних матеріалів?
22. Навіщо у випадках анізотропного плазмохімічного травлення в плазмі, що полімеризується, необхідно вводити операцію ізотропного травлення полімерної плівки?
23. Чому в більшості випадків травлення неорганічних матеріалів у плазмі, особливо у випадках анізотропного і селективного травлення, потрібні додаткові операції очищення поверхні та видалення дефектів структури?
24. Основні області застосування плазмохімічного травлення в технології.
25. Перечисліть відомі вам якісні методи контролю чистоти поверхні. Коротко опишіть процедуру контролю чистоти поверхні одним з цих методів.
26. З яких основних блоків складається установка плазмохімічного травлення?
27. Опишіть роботу плазмохімічного реактора з індуктивним збудженням розряду.
28. Опишіть роботу плазмохімічного реактора з ємкісним збудженням розряду.
29. Приведіть спрощену схему установки ПХТ та коротко опишіть її роботу.
30. Чому в плазмохімічній реактор по завершенню процесу травлення напускається азот, а не повітря?

Література

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – Москва : Энергоатомиздат, 1989.
2. Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов, – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И., Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур, – Москва : Радио и связь, 1983.
4. Шехтер А.Б. Химические реакции в электрическом разряде. Л-М.: ОНТИ: Главная редакция общетехнической литературы, 1935;
5. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. Под ред. Л.С.Полака, М.: Наука, 1965;
6. Очерки физики и химии плазмы. Под ред. Л.С.Полака. М.: Наука, 1971;
7. Полак Л.С., Овсянников А.А., Словецкий Д.И., Вурзель Ф.Б. Теоретическая и прикладная плазмохимия. М.: Наука, 1975;
8. Химия плазмы. Под ред. Б.М. Смирнова, вып. 1, 1975 - вып. 17, 1993. М.: Энергоатомиздат;
9. Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Получение связанного азота в плазме. Киев: "Вища школа", 1976;
10. Плазмохимические реакции и процессы. Под ред. Л.С. Полака. М.: Наука, 1977;
11. Компаниец В.З., Овсянников А.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Химические реакции в турбулентных потоках газа и плазмы. М.: Наука, 1978;
12. Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение. М.: Наука, 1979;

13. Пархоменко В.Д., Полак Л.С., Сорока П.И. и др. Процессы и аппараты плазмохимической технологии. Киев: "Вища школа", 1979;
14. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980;
15. Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981;
16. Високов Г.П. Приложна Плазмохимия. Част 1,2. Държавно издателство "Техника", София, 1984;
17. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984; Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985, 216с;
18. Туманов Ю.Н. Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1989, 279 с;
19. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990, 200 с;
20. Химия плазмы. Под ред. Л.С.Полака и Ю.А.Лебедева Новосибирск: Наука, 1991;
21. Овсянников А.А., Энгельшт В.С., Лебедев Ю.А. и др. Диагностика низкотемпературной плазмы. Новосибирск, : Наука, 1994;